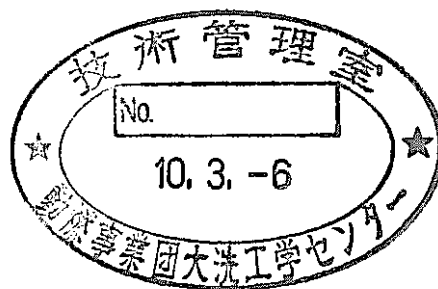


# 蒸気発生器水ブロー系の最適運用に係わる計算

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)



1997年9月

新型炉技術開発株式会社

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

1997年9月

## 蒸気発生器水ブロー系の最適運用に係わる計算

吉岡直樹(\*), 岸田雅子(\*)  
長田博夫(\*)

### 要 旨

蒸気発生器（SG）の安全性評価上重要な課題と考えられている伝熱管の過熱型破損事象に関する研究が進められている。この事象では伝熱管内の除熱効果が評価結果に大きな影響を及ぼすことから、通常運転時及び水ブロー中を含めて水蒸気系の挙動を詳細評価して、除熱条件を定めることが重要である。本作業では過熱型破損事象の評価に必要な除熱条件を定めることを目的に、主に水蒸気系の設備仕様や運転条件をパラメータにしたBLOOPHコードによる水ブロー解析、及び、反応熱を考慮した水側状態量の補正を行った。

また、BLOOPHコードによる解析の妥当性を確認するため、汎用熱流動解析コードRELAP5/Mod.2による水ブロー解析を行った。

これら作業により以下の結果が得られた。

- (1) 放出弁容量等を変更した場合のブロー特性の変化を把握できた。また、ブロー途中で伝熱管内で発生する可能性のある極低流量の継続時間を短縮する方法を見出した。
- (2) 放出系容量の最適設計手法を案出した。
- (3) 過熱型破損事象の評価に必要な除熱条件を定めることが出来た。
- (4) 同じ解析課題に対するBLOOPHとRELAP5/Mod.2の解析結果は、圧力及び流動挙動に関し、概ね一致した。このことによりBLOOPHコードによる解析の妥当性が確認された。
- (5) BLOOPHコードの解析精度の確認、向上のために必要な開発課題が明かとなった。

---

本報告書は、新型炉技術開発株式会社が動力炉・核燃料開発事業団との契約により実施した業務の成果である。

契約番号：09C0916

事業団担当部課室及び担当者：大洗工学センター安全工学部プラント安全工学室 浜田 広次

\* 新型炉技術開発株式会社

Analyses for finding the most suitable operation method  
of steam generator water/steam blow-down system

Naoki Yoshioka\*, Masako Kishida\*  
Hiroo Osada\*

Abstract

The steam generator (SG) tube rupture phenomenon due to overheating by sodium-water reaction is considered as an important issue on SG safety evaluation and has been studied intensively. At this phenomenon, the cooling effect by the water/steam flow inside the tubes plays a significant role. Therefore, it is important to define the cooling effect by analyzing the behavior of the water/steam side during normal operation and during water/steam blow-down for overheating failure evaluation.

In this work, the cooling effect was analyzed by a FBR SG blow-down analysis code, BLOOPH, and was corrected by taking the generated heat from the sodium-water reaction into account. In these analyses, the capacity and the operation method of the SG blow down system were treated as parameters. In order to confirm validity of the BLOOPH code, a similar analysis was carried out for the reference case by the thermal-hydraulic analysis code, RELAP5/Mod.2, that has been used widely for analyses of the LOCA phenomena of LWRs.

The following results have been obtained by this work.

- (1) The effect of the capacity of the SG blow-down system on the SG blow-down characteristics has been well understood. A method has been found for reducing the time duration of the small flow rate which might occur inside the tubes during the blow-down.
- (2) A methodology has been established to design the most optimum SG blow-down system.
- (3) Analyses have been performed to define the cooling conditions needed for overheating failure evaluation.
- (4) The results by the code BLOOPH and RELAP5 have shown a reasonably good agreement regarding the water/steam pressure and the hydraulic behavior during the blow-down for the reference blow-down system. The validity of the BLOOPH code has been confirmed.
- (5) Research and development items have been clarified to improve the BLOOPH code in future.

.....  
Work performed by Advanced Reactor Technology Co.,Ltd.,under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

PNC Liaison : Hirotsugu Hamada, FBR Plant Safety Section,Safety Engineering Division,  
Oarai Engineering Center

\* : Advanced Reactor Technology Co.,Ltd.

— 目 次 —

|                                               |       |
|-----------------------------------------------|-------|
| 1. まえがき .....                                 | 1-1   |
| 2. BLOOPH による水ブロー解析 .....                     | 2.1-1 |
| 2.1 解析モデル .....                               | 2.1-1 |
| 2.2 解析条件 .....                                | 2.2-1 |
| 2.3 解析ケース .....                               | 2.3-1 |
| 2.4 解析結果 .....                                | 2.4-1 |
| 2.5 検討 .....                                  | 2.5-1 |
| 3. 反応熱を考慮した水側状態量の補正 .....                     | 3.1-1 |
| 3.1 補正の考え方 .....                              | 3.1-1 |
| 3.2 補正の方法 .....                               | 3.2-1 |
| 3.3 補正計算の条件 .....                             | 3.3-1 |
| 3.4 補正計算の結果 .....                             | 3.4-1 |
| 4. RELAP5/Mod.2 による水ブロー解析 .....               | 4.1-1 |
| 4.1 解析条件 .....                                | 4.1-1 |
| 4.2 定常計算 .....                                | 4.2-1 |
| 4.3 水ブロー解析 .....                              | 4.3-1 |
| 4.4 RELAP5/Mod.2 による水ブロー解析のまとめ .....          | 4.4-1 |
| 5. まとめ .....                                  | 5-1   |
| 6. 謝辞 .....                                   | 6-1   |
| 7. 参考文献 .....                                 | 7-1   |
| 添付資料 A 解析コード BLOOPH の概要 .....                 | A-0   |
| 添付資料 B 反応域での温度分布を考慮した場合の加熱補正計算 ...            | B-1   |
| 添付資料 C 水蒸気系各種弁仕様<br>(実機熱過渡解析用データと最新データ) ..... | C-1   |
| 添付資料 D ケース 1 から 4 の水ブロー解析結果 .....             | D-1   |
| 添付資料 E 適用した水／蒸気二相流熱伝達率相関式 .....               | E-1   |
| 添付資料 F EV 入口放出ラインのアイソメ図 .....                 | F-1   |
| 添付資料 G BLOOPH と RELAP の解析モデル比較表 .....         | G-1   |

## 表リスト

|        |                                                      |        |
|--------|------------------------------------------------------|--------|
| 表2.2-1 | SG 廻りの運転条件 .....                                     | 2.2-2  |
| 表2.2-2 | 蒸気発生器伝熱管小破損時水ブロー解析条件 .....                           | 2.2-3  |
| 表2.3-1 | 解析ケースとブロー弁容量・運用条件 .....                              | 2.3-3  |
| 表3.2-1 | 使用伝熱計算式一覧 .....                                      | 3.2-10 |
| 表3.4-1 | 全体加熱を考慮した反応域入口水側条件 .....                             | 3.4-3  |
| 表3.4-2 | 100% 出力及び 40% 出力運転時の EV 管東部上部と<br>下部の水側状態量補正結果 ..... | 3.4-3  |
| 表3.4-3 | MjSG ブロー解析ポスト処理 (RUPIN) 解析ケース (蒸発器) .....            | 3.4-5  |
| 表4.1-1 | SG 運転条件 .....                                        | 4.1-5  |
| 表4.1-2 | 伝熱管外表面温度 .....                                       | 4.1-5  |
| 表4.1-3 | 壁面熱伝達モデル (RELAP5/Mod.2) .....                        | 4.1-6  |
| 表4.1-4 | 解析コード BLOOPH の使用モデル、計算式一覧 .....                      | 4.1-7  |
| 表4.2-1 | BLOOPH と RELAP5/Mod.2 の抵抗係数 .....                    | 4.2-3  |
| 表4.2-2 | 定常熱交換量 (MW) .....                                    | 4.2-3  |
| 表4.2-3 | BLOOPH と RELAP の EV ヘリカルコイル部保有水量比較 (kg) ...          | 4.2-4  |
| 表4.3-1 | SH 入口止弁流量特性 .....                                    | 4.3-5  |
| 表4.3-2 | 蒸気発生器伝熱管小破損時水ブロー解析条件 .....                           | 4.3-6  |
| 表4.3-3 | SG 出入口放出弁呼び径 .....                                   | 4.3-5  |
| 表4.3-4 | SG 出入口放出弁流出係数 .....                                  | 4.3-7  |

## 図リスト

|            |                                             |        |
|------------|---------------------------------------------|--------|
| 図2.1-1     | 蒸気発生器回り水蒸気系配管系統図 .....                      | 2.1-2  |
| 図2.1-2     | "BLOOPH" コードの計算モデル<br>(水側ノード、流路番号の対応) ..... | 2.1-3  |
| 図2.1-3     | 蒸発器及び過熱器のノード分割と伝熱管長さ .....                  | 2.1-4  |
| 図2.2-1     | SG 周り制御弁の開度特性 .....                         | 2.2-4  |
| 図2.4(1)-1  | SG 出入口圧力変化 (定格運転状態からのブロー) .....             | 2.4-2  |
| 図2.4(1)-2  | SG 出入口放出弁流量 (定格運転状態からのブロー) .....            | 2.4-3  |
| 図2.4(1)-3  | EV コイル下部流量変化 (定格運転状態からのブロー) .....           | 2.4-4  |
| 図2.4(1)-4  | EV 管束部上部流量変化 (定格運転状態からのブロー) .....           | 2.4-5  |
| 図2.4(1)-5  | SH コイル流量変化 (定格運転状態からのブロー) .....             | 2.4-6  |
| 図2.4(1)-6  | SH コイル部流量変化 (定格運転状態からのブロー) .....            | 2.4-7  |
| 図2.4(1)-7  | EV コイル下部温度変化 (定格運転状態からのブロー) .....           | 2.4-8  |
| 図2.4(1)-8  | EV コイル上部温度変化 (定格運転状態からのブロー) .....           | 2.4-9  |
| 図2.4(1)-9  | EV コイル下部熱伝達係数変化<br>(定格運転状態からのブロー) .....     | 2.4-10 |
| 図2.4(1)-10 | EV コイル下部熱伝達係数変化<br>(定格運転状態からのブロー) .....     | 2.4-11 |
| 図2.4(3)-1  | SG 出入口圧力変化 (定格運転状態からのブロー) .....             | 2.4-12 |
| 図2.4(3)-2  | SG 出入口放出弁流量 (定格運転状態からのブロー) .....            | 2.4-13 |
| 図2.4(3)-3  | EV コイル下部流量変化 (定格運転状態からのブロー) .....           | 2.4-14 |
| 図2.4(3)-4  | EV 管束部上部流量変化 (定格運転状態からのブロー) .....           | 2.4-15 |
| 図2.4(3)-5  | SH コイル流量変化 (定格運転状態からのブロー) .....             | 2.4-16 |
| 図2.4(3)-6  | SH コイル部流量変化 (定格運転状態からのブロー) .....            | 2.4-17 |
| 図2.4(3)-7  | EV コイル下部温度変化 (定格運転状態からのブロー) .....           | 2.4-18 |
| 図2.4(3)-8  | EV コイル上部温度変化 (定格運転状態からのブロー) .....           | 2.4-19 |
| 図2.4(3)-9  | EV コイル下部熱伝達係数変化<br>(定格運転状態からのブロー) .....     | 2.4-20 |

|            |                                   |        |
|------------|-----------------------------------|--------|
| 図2.4(3)-10 | EV コイル下部熱伝達係数変化<br>(定格運転状態からのブロー) | 2.4-21 |
| 図2.4(4)-1  | SG 出入口圧力変化 (定格運転状態からのブロー)         | 2.4-22 |
| 図2.4(4)-2  | SG 出入口放出弁流量 (定格運転状態からのブロー)        | 2.4-23 |
| 図2.4(4)-3  | EV コイル下部流量変化 (定格運転状態からのブロー)       | 2.4-24 |
| 図2.4(4)-4  | EV 管束部上部流量変化 (定格運転状態からのブロー)       | 2.4-25 |
| 図2.4(4)-5  | SH コイル流量変化 (定格運転状態からのブロー)         | 2.4-26 |
| 図2.4(4)-6  | SH コイル部流量変化 (定格運転状態からのブロー)        | 2.4-27 |
| 図2.4(4)-7  | EV コイル下部温度変化 (定格運転状態からのブロー)       | 2.4-28 |
| 図2.4(4)-8  | EV コイル上部温度変化 (定格運転状態からのブロー)       | 2.4-29 |
| 図2.4(4)-9  | EV コイル下部熱伝達係数変化<br>(定格運転状態からのブロー) | 2.4-30 |
| 図2.4(4)-10 | EV コイル下部熱伝達係数変化<br>(定格運転状態からのブロー) | 2.4-31 |
| 図2.4(5)-1  | SG 出入口圧力変化 (定格運転状態からのブロー)         | 2.4-32 |
| 図2.4(5)-2  | SG 出入口放出弁流量 (定格運転状態からのブロー)        | 2.4-33 |
| 図2.4(5)-3  | EV コイル下部流量変化 (定格運転状態からのブロー)       | 2.4-34 |
| 図2.4(5)-4  | EV 管束部上部流量変化 (定格運転状態からのブロー)       | 2.4-35 |
| 図2.4(5)-5  | SH コイル流量変化 (定格運転状態からのブロー)         | 2.4-36 |
| 図2.4(5)-6  | SH コイル部流量変化 (定格運転状態からのブロー)        | 2.4-37 |
| 図2.4(5)-7  | EV コイル下部温度変化 (定格運転状態からのブロー)       | 2.4-38 |
| 図2.4(5)-8  | EV コイル上部温度変化 (定格運転状態からのブロー)       | 2.4-39 |
| 図2.4(5)-9  | EV コイル下部熱伝達係数変化<br>(定格運転状態からのブロー) | 2.4-40 |
| 図2.4(5)-10 | EV コイル下部熱伝達係数変化<br>(定格運転状態からのブロー) | 2.4-41 |
| 図2.4(6)-1  | SG 出入口圧力変化                        | 2.4-42 |
| 図2.4(6)-2  | SG 出入口放出弁流量                       | 2.4-43 |
| 図2.4(6)-3  | EV コイル下部流量変化                      | 2.4-44 |
| 図2.4(6)-4  | EV 管束部上部流量変化                      | 2.4-45 |



|            |                                   |        |
|------------|-----------------------------------|--------|
| 図2.4(6)-5  | SH コイル流量変化                        | 2.4-46 |
| 図2.4(6)-6  | SH コイル部流量変化                       | 2.4-47 |
| 図2.4(6)-7  | EV コイル下部温度変化                      | 2.4-48 |
| 図2.4(6)-8  | EV コイル上部温度変化                      | 2.4-49 |
| 図2.4(6)-9  | EV コイル下部熱伝達係数変化                   | 2.4-50 |
| 図2.4(6)-10 | EV コイル下部熱伝達係数変化                   | 2.4-51 |
| 図2.4(7)-1  | SG 出入口圧力変化（定格運転状態からのブロー）          | 2.4-52 |
| 図2.4(7)-2  | SG 出入口放出弁流量（定格運転状態からのブロー）         | 2.4-53 |
| 図2.4(7)-3  | EV コイル下部流量変化（定格運転状態からのブロー）        | 2.4-54 |
| 図2.4(7)-4  | EV 管束部上部流量変化（定格運転状態からのブロー）        | 2.4-55 |
| 図2.4(7)-5  | SH コイル流量変化（定格運転状態からのブロー）          | 2.4-56 |
| 図2.4(7)-6  | SH コイル部流量変化（定格運転状態からのブロー）         | 2.4-57 |
| 図2.4(7)-7  | EV コイル下部温度変化（定格運転状態からのブロー）        | 2.4-58 |
| 図2.4(7)-8  | EV コイル上部温度変化（定格運転状態からのブロー）        | 2.4-59 |
| 図2.4(7)-9  | EV コイル下部熱伝達係数変化<br>（定格運転状態からのブロー） | 2.4-60 |
| 図2.4(7)-10 | EV コイル下部熱伝達係数変化<br>（定格運転状態からのブロー） | 2.4-61 |
| 図2.4(8)-1  | SG 出入口圧力変化（定格運転状態からのブロー）          | 2.4-62 |
| 図2.4(8)-2  | SG 出入口放出弁流量（定格運転状態からのブロー）         | 2.4-63 |
| 図2.4(8)-3  | EV コイル下部流量変化（定格運転状態からのブロー）        | 2.4-64 |
| 図2.4(8)-4  | EV 管束部上部流量変化（定格運転状態からのブロー）        | 2.4-65 |
| 図2.4(8)-5  | SH コイル流量変化（定格運転状態からのブロー）          | 2.4-66 |
| 図2.4(8)-6  | SH コイル部流量変化（定格運転状態からのブロー）         | 2.4-67 |
| 図2.4(8)-7  | EV コイル下部温度変化（定格運転状態からのブロー）        | 2.4-68 |
| 図2.4(8)-8  | EV コイル上部温度変化（定格運転状態からのブロー）        | 2.4-69 |
| 図2.4(8)-9  | EV コイル下部熱伝達係数変化<br>（定格運転状態からのブロー） | 2.4-70 |
| 図2.4(8)-10 | EV コイル下部熱伝達係数変化<br>（定格運転状態からのブロー） | 2.4-71 |

|         |                                    |        |
|---------|------------------------------------|--------|
| 図3.2-1  | 計算モデルとメッシュ分割概念 .....               | 3.2-11 |
| 図3.2-2  | エネルギーバランス計算式 .....                 | 3.2-11 |
| 図3.2-3  | SG 伝熱管内熱伝達率評価用相関図 .....            | 3.2-12 |
| 図3.2-4  | 計算モデルとメッシュ分割概念 .....               | 3.2-13 |
| 図3.2-5  | 水側計算モデル図 .....                     | 3.2-13 |
| 図3.4-1  | 伝熱管中心温度と水側温度 (EV リンク 6) .....      | 3.4-6  |
| 図3.4-2  | 伝熱管中心温度と水側温度 (EV リンク 8) .....      | 3.4-7  |
| 図3.4-3  | 伝熱管中心温度と水側温度 (EV リンク 9) .....      | 3.4-8  |
| 図3.4-4  | 水側熱伝達率と流量 (EV リンク 6) .....         | 3.4-9  |
| 図3.4-5  | 水側熱伝達率と流量 (EV リンク 8) .....         | 3.4-10 |
| 図3.4-6  | 水側熱伝達率と流量 (EV リンク 9) .....         | 3.4-11 |
| 図3.4-7  | クオリティと Re 数 入口ノード (EV リンク 6) ..... | 3.4-12 |
| 図3.4-8  | クオリティと Re 数 出口ノード (EV リンク 6) ..... | 3.4-13 |
| 図3.4-9  | クオリティと Re 数 入口ノード (EV リンク 8) ..... | 3.4-14 |
| 図3.4-10 | クオリティと Re 数 出口ノード (EV リンク 8) ..... | 3.4-15 |
| 図3.4-11 | クオリティと Re 数 入口ノード (EV リンク 9) ..... | 3.4-16 |
| 図3.4-12 | クオリティと Re 数 出口ノード (EV リンク 9) ..... | 3.4-17 |
| 図3.4-13 | 伝熱管中心温度と水側温度 (EV リンク 6) .....      | 3.4-18 |
| 図3.4-14 | 伝熱管中心温度と水側温度 (EV リンク 8) .....      | 3.4-19 |
| 図3.4-15 | 伝熱管中心温度と水側温度 (EV リンク 9) .....      | 3.4-20 |
| 図3.4-16 | 水側熱伝達率と流量 (EV リンク 6) .....         | 3.4-21 |
| 図3.4-17 | 水側熱伝達率と流量 (EV リンク 8) .....         | 3.4-22 |
| 図3.4-18 | 水側熱伝達率と流量 (EV リンク 9) .....         | 3.4-23 |
| 図3.4-19 | クオリティと Re 数 入口ノード (EV リンク 6) ..... | 3.4-24 |
| 図3.4-20 | クオリティと Re 数 出口ノード (EV リンク 6) ..... | 3.4-25 |
| 図3.4-21 | クオリティと Re 数 入口ノード (EV リンク 8) ..... | 3.4-26 |
| 図3.4-22 | クオリティと Re 数 出口ノード (EV リンク 8) ..... | 3.4-27 |
| 図3.4-23 | クオリティと Re 数 入口ノード (EV リンク 9) ..... | 3.4-28 |
| 図3.4-24 | クオリティと Re 数 出口ノード (EV リンク 9) ..... | 3.4-29 |
| 図3.4-25 | 伝熱管中心温度と水側温度 (EV リンク 6) .....      | 3.4-30 |

|         |                                             |        |
|---------|---------------------------------------------|--------|
| 図3.4-26 | 伝熱管中心温度と水側温度 (EV リンク 8) .....               | 3.4-31 |
| 図3.4-27 | 伝熱管中心温度と水側温度 (EV リンク 9) .....               | 3.4-32 |
| 図3.4-28 | 水側熱伝達率と流量 (EV リンク 6) .....                  | 3.4-33 |
| 図3.4-29 | 水側熱伝達率と流量 (EV リンク 8) .....                  | 3.4-34 |
| 図3.4-30 | 水側熱伝達率と流量 (EV リンク 9) .....                  | 3.4-35 |
| 図3.4-31 | 伝熱管中心温度と水側温度 (EV リンク 6) .....               | 3.4-36 |
| 図3.4-32 | 伝熱管中心温度と水側温度 (EV リンク 8) .....               | 3.4-37 |
| 図3.4-33 | 伝熱管中心温度と水側温度 (EV リンク 9) .....               | 3.4-38 |
| 図3.4-34 | 水側熱伝達率と流量 (EV リンク 6) .....                  | 3.4-39 |
| 図3.4-35 | 水側熱伝達率と流量 (EV リンク 8) .....                  | 3.4-40 |
| 図3.4-36 | 水側熱伝達率と流量 (EV リンク 9) .....                  | 3.4-41 |
| 図3.4-37 | 伝熱管中心温度と水側温度 (EV リンク 6) .....               | 3.4-42 |
| 図3.4-38 | 伝熱管中心温度と水側温度 (EV リンク 8) .....               | 3.4-43 |
| 図3.4-39 | 伝熱管中心温度と水側温度 (EV リンク 9) .....               | 3.4-44 |
| 図3.4-40 | 水側熱伝達率と流量 (EV リンク 6) .....                  | 3.4-45 |
| 図3.4-41 | 水側熱伝達率と流量 (EV リンク 8) .....                  | 3.4-46 |
| 図3.4-42 | 水側熱伝達率と流量 (EV リンク 9) .....                  | 3.4-47 |
| 図3.4-43 | 伝熱管中心温度と水側温度 (EV リンク 6) .....               | 3.4-48 |
| 図3.4-44 | 伝熱管中心温度と水側温度 (EV リンク 8) .....               | 3.4-49 |
| 図3.4-45 | 伝熱管中心温度と水側温度 (EV リンク 9) .....               | 3.4-50 |
| 図3.4-46 | 水側熱伝達率と流量 (EV リンク 6) .....                  | 3.4-51 |
| 図3.4-47 | 水側熱伝達率と流量 (EV リンク 8) .....                  | 3.4-52 |
| 図3.4-48 | 水側熱伝達率と流量 (EV リンク 9) .....                  | 3.4-53 |
| 図4.1-1  | もんじゅ SG ブローダウン解析モデル (RELAP5/Mod.2) .....    | 4.1-8  |
| 図4.1-2  | "BLOOPH" コードの計算モデル<br>(水側ノード、流路番号の対応) ..... | 4.1-9  |
| 図4.2-1  | BLOOPH と RELAP の定常水側圧力比較 .....              | 4.2-5  |
| 図4.2-2  | BLOOPH と RELAP の定常水側温度比較 .....              | 4.2-5  |
| 図4.2-3  | BLOOPH と RELAP の定常水側クォリティ比較 .....           | 4.2-6  |
| 図4.2-4  | BLOOPH と RELAP の定常水側熱伝達係数比較 .....           | 4.2-6  |

|         |                                             |        |
|---------|---------------------------------------------|--------|
| 図4.3-1  | SG 給水流量変化（定格運転状態からのブロー） .....               | 4.3-8  |
| 図4.3-2  | SG 廻り制御弁の開度特性 .....                         | 4.3-9  |
| 図4.3-3  | SH 入口止弁流量変化（定格運転状態からのブロー） .....             | 4.3-10 |
| 図4.3-4  | SG 出 入口放出弁流量（定格運転状態からのブロー） .....            | 4.3-11 |
| 図4.3-5  | SG 出入口圧力変化（定格運転状態からのブロー） .....              | 4.3-12 |
| 図4.3-6  | EV コイル下部流量変化（定格運転状態からのブロー） .....            | 4.3-13 |
| 図4.3-7  | EV コイル上部流量変化（定格運転状態からのブロー） .....            | 4.3-14 |
| 図4.3-8  | EV コイル下部温度変化（定格運転状態からのブロー） .....            | 4.3-15 |
| 図4.3-9  | EV コイル上部温度変化（定格運転状態からのブロー） .....            | 4.3-16 |
| 図4.3-10 | EV コイル下部クオリティ変化<br>（定格運転状態からのブロー） .....     | 4.3-17 |
| 図4.3-11 | EV コイル上部クオリティ変化<br>（定格運転状態からのブロー） .....     | 4.3-18 |
| 図4.3-12 | EV コイル熱伝達係数変化（1/12）<br>（定格運転状態からのブロー） ..... | 4.3-19 |
| 図4.3-13 | EV コイル熱伝達係数変化（2/12）<br>（定格運転状態からのブロー） ..... | 4.3-20 |
| 図4.3-14 | EV コイル熱伝達係数変化（3/12）<br>（定格運転状態からのブロー） ..... | 4.3-21 |
| 図4.3-15 | EV コイル熱伝達係数変化（4/12）<br>（定格運転状態からのブロー） ..... | 4.3-22 |
| 図4.3-16 | EV コイル熱伝達係数変化（5/12）<br>（定格運転状態からのブロー） ..... | 4.3-23 |
| 図4.3-17 | EV コイル熱伝達係数変化（6/12）<br>（定格運転状態からのブロー） ..... | 4.3-24 |
| 図4.3-18 | EV コイル熱伝達係数変化（7/12）<br>（定格運転状態からのブロー） ..... | 4.3-25 |
| 図4.3-19 | EV コイル熱伝達係数変化（8/12）<br>（定格運転状態からのブロー） ..... | 4.3-26 |
| 図4.3-20 | EV コイル熱伝達係数変化（9/12）                         |        |

|         |                                               |        |
|---------|-----------------------------------------------|--------|
|         | (定格運転状態からのブロー) .....                          | 4.3-27 |
| 図4.3-21 | EV コイル熱伝達係数変化 (10/12)<br>(定格運転状態からのブロー) ..... | 4.3-28 |
| 図4.3-22 | EV コイル熱伝達係数変化 (11/12)<br>(定格運転状態からのブロー) ..... | 4.3-29 |
| 図4.3-23 | EV コイル熱伝達係数変化 (12/12)<br>(定格運転状態からのブロー) ..... | 4.3-30 |

## 1. まえがき

動燃事業団殿（以下動燃殿と呼称）では、蒸気発生器（SG）伝熱管の過熱型破損事象を対象とした健全性評価が実施されている。この事象では伝熱管内の除熱効果が評価結果に大きな影響を及ぼすことから、通常運転時及び水ブロー中を含めた水蒸気系の挙動を詳細評価して、除熱条件を定めることが重要である。本作業では、蒸気発生器伝熱管健全性評価に必要な除熱条件を定めることを目的に、主に水蒸気系の設備仕様や運転条件をパラメータにした水ブロー解析を行った。

なお、本作業の主要項目は以下の通りであり、作業フロー及びそれらの相互関連を図1-1に示す。

- (1) BLOOPHによる水ブロー解析
- (2) 反応熱の影響を考慮した水側状態量の補正
- (3) RELAP5/Mod.2による水ブロー解析

このうち、上記(3)は、BLOOPHによる水ブロー解析の妥当性を確認するために実施したものである。

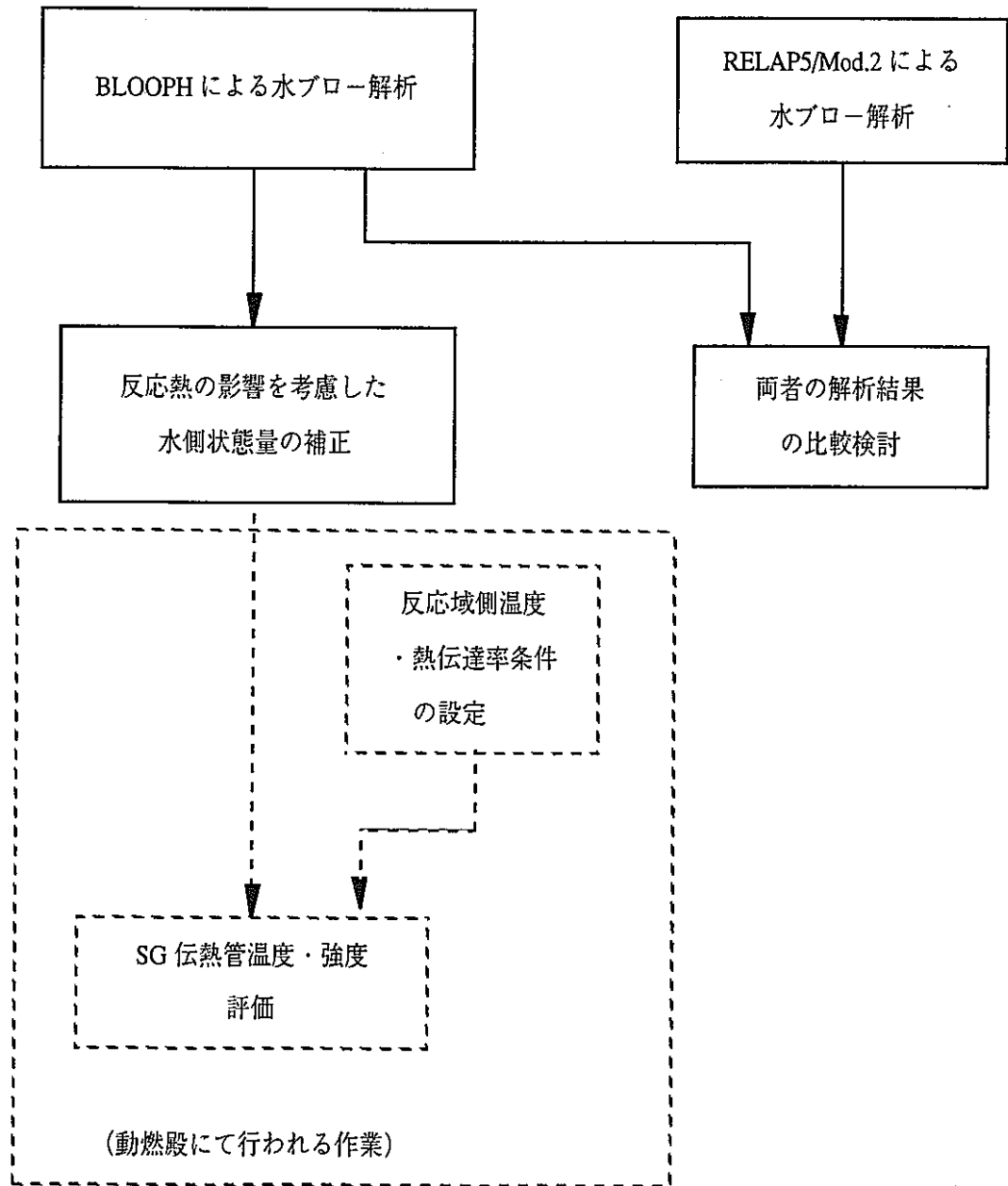


図1-1 作業フローと相互関連

## 2. BLOOPH による水ブロー解析

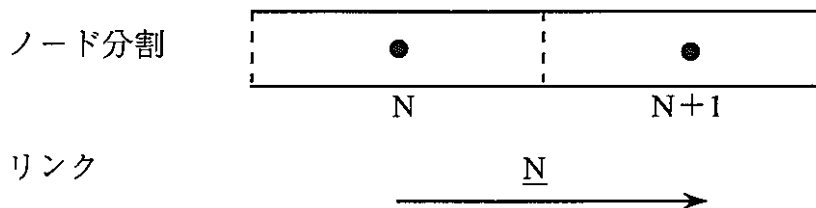
SG 水ブロー解析には、50 MWSGTF の水ブロー試験により検証され、実機の水ブロー時 SG 周りの熱過渡解析に用いられた、SG 水ブローダウン解析コード“BLOOPH”を使用した。“BLOOPH”コードの解析モデル等、解析コードの概要を参考文献 1) から抜粋して添付資料 A に示す。

### 2.1 解析モデル

実機の水／蒸気系の配管系統図を図2.1-1 に示す。また、解析計算モデルを図2.1-2 に示す。

解析計算モデルは、SG 周りの Na 系、水／蒸気系を対象とし、Na 系については過熱器 (SH) 入口から蒸発器 (EV) 出口までを、また、水／蒸気系については EV 入口止弁から SH 出口止弁までを対象としている。これらの境界のうち、Na 側については SH 入口の Na 流量、温度を境界条件とし、水／蒸気側については、EV 入口の流量、SH 出口の圧力を境界条件としている。なお、これら境界条件としては、プラント全体の過渡解析の結果（実機熱過渡解析の結果）を入力データとして与えた。

又、蒸発器と過熱器のノード分割と伝熱管長さを図2.1-3に示す。リンクは下図の通り概ねノード中心からノード中心までの流路として定義される。







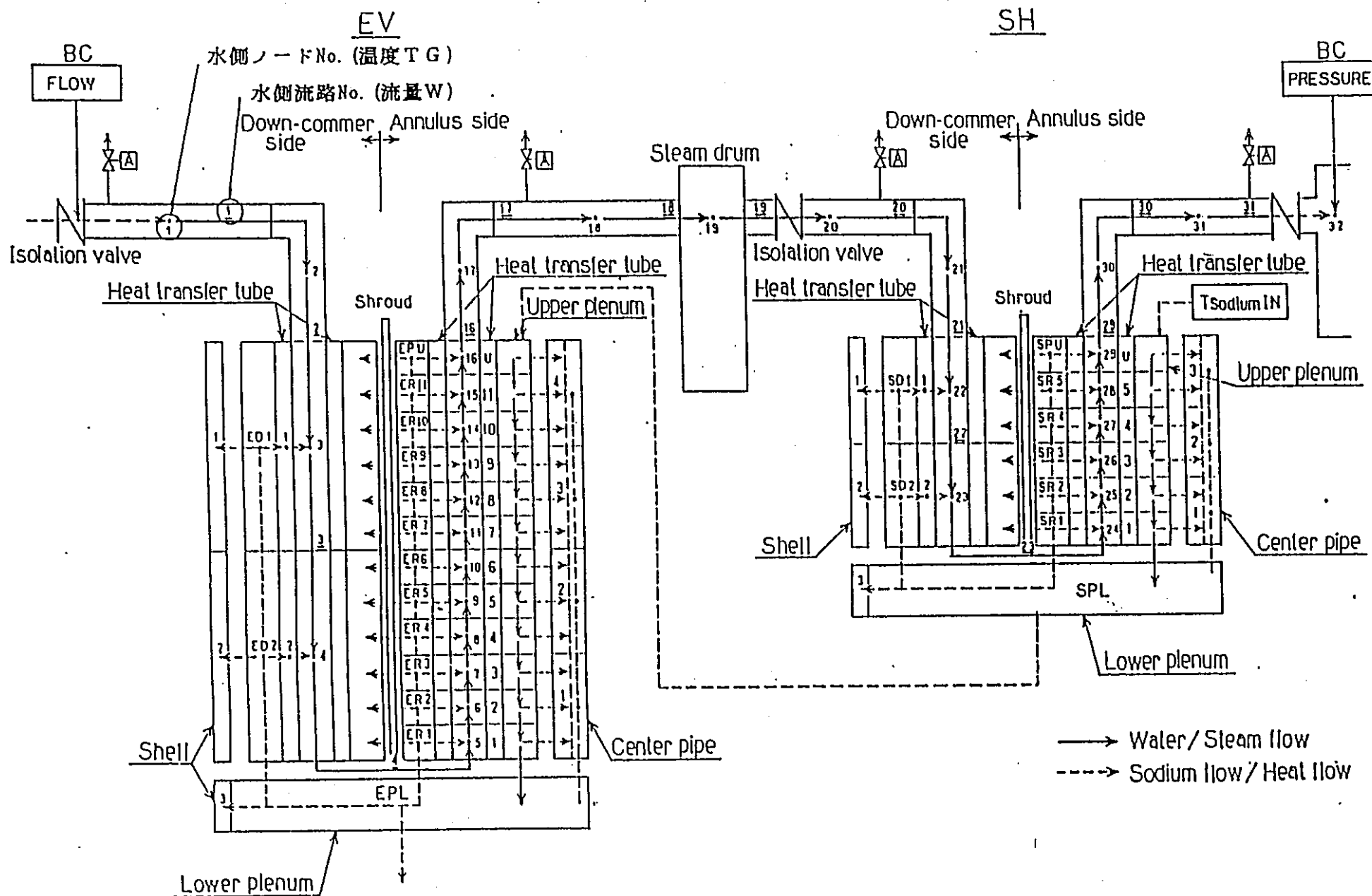


図2.1-2 "BLOOPH" コードの計算モデル (水側ノード、流路番号の対応)

注) ○印はノード番号を示す。

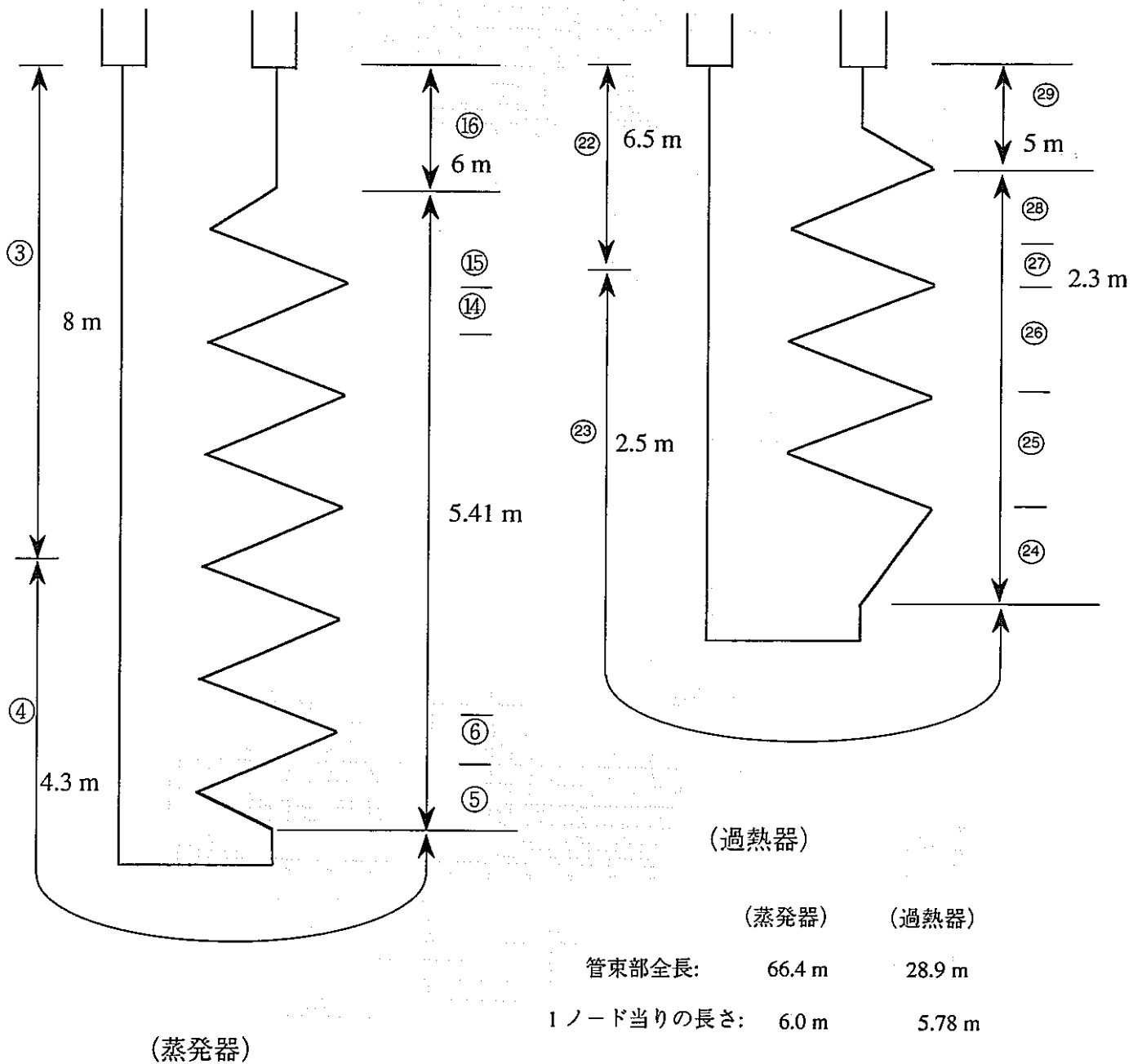


図2.1-3 蒸発器及び過熱器のノード分割と伝熱管長さ

## 2.2 解析条件

100% 定格出力運転と40% 部分出力運転時の SG 周りの運転条件を表2.2-1 に示す。また、実機 SG 周りの系統機器構成のモデル図と現状設備に対する主要解析条件を表2.2-2 に、更に、SG 周りの制御弁の開度特性を図2.2-1 に示す。

なお、設備データは現状の最新設備データを基とすることとしていたが、ベースとすべき別途実施中の総点検作業でのデータ整備が終了しておらず、本作業の工程上止むを得ず実機熱過渡解析用データ<sup>2)</sup>に依るものとした。

これら設備データのうち、EV 出口ドレン弁、SH 出口ドレン弁を除く放出弁の、解析上の流路断面積は、次の様に算定した。

実機熱過渡解析用として与えられているデータは、100% 出力運転時の水／蒸気条件での弁全開時の放出流量（及び 100%出力運転時の給水流量に対する放出流量のパーセンテージ）である。例えばEV 出口放出弁の場合、198 t/h (52%) であるが、解析では試解析を行ない、この流量が得られる様な流路断面積を求め、これを入力とした。なお、この試解析の際弁の流量係数は 0.6 とした。

添付資料 C に、各放出弁の実機熱過渡解析用データと最新データを示すが最新データはやや大きめであり、ブロー時間に関して言えば、最新データを用いた解析の方が若干短縮される。但し、実機の SG ブロー試験はこれまで行われておらず、従って BLOOPH による解析のための弁流路面積、流量係数の妥当性も確認されていないため、これら放出弁データの扱いには注意を要する。

表2.2-1 SG 周りの運転条件

| 項 目     | 単 位    | 定格出力                 | 40% 部分出力             |
|---------|--------|----------------------|----------------------|
| Na 入口温度 | ℃      | SH: 505<br>EV: 468.9 | SH: 489<br>EV: 456   |
| Na 出口温度 | ℃      | EV: 325              | EV: 284              |
| Na 流量   | ton/hr | 3730                 | 1438                 |
| 給水入口温度  | ℃      | 240                  | 195                  |
| 蒸気出口温度  | ℃      | SH: 487<br>EV: 368.4 | SH: 486<br>EV: 368   |
| 給水流量    | ton/hr | 379                  | 155                  |
| 蒸気出口圧力  | atg    | SH: 132<br>EV: 145   | SH: 128<br>EV: 130.5 |
| 給水入口圧力  | atg    | 153                  | 131.0                |

表2.2-2 蒸気発生器伝熱管小破損時水ブロー解析条件

| <p>事象の概要</p>             | <p>Bループの蒸発器で水リークが発生し、Na中水素濃度上昇高々等により、Bループカクリ2次ポンプトリップ(2.0sec)→原子炉トリップとなる。解析は、水リークスイッチONから開始し、1sec遅れて給水しゃ断、SH出口止弁閉、SH入口止弁閉、EV入口放出弁、EV出口放出弁、SH入口放出弁、SH出口放出弁、2sec遅れてSH出口ドレン弁閉、SH入口止弁閉後1sec遅れてEV出口ドレン弁閉</p> |           |                  |                                       |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|------------------|---------------------------------------|
| 初期条件                     | 100%出力                                                                                                                                                                                                  | 解析使用弁名    | 弁作動状況(図2.2-1 参照) |                                       |
| ナ                        | SG入口流量                                                                                                                                                                                                  | 1036 kg/s | EV入口止弁           | 1~6secで閉止                             |
| ト                        | SH入口温度                                                                                                                                                                                                  | 505 °C    | SH出口止弁           | 1~133secで閉←逆止弁がはやいのでむし                |
| リ                        | SH出口温度                                                                                                                                                                                                  | 469 °C    | EV入口放出弁          | 1~2secで全開 $Aco=1.18 \times 10^{-3}$   |
| ウ                        | EV入口温度                                                                                                                                                                                                  | 469 °C    | EV出口ドレン弁         | 7~43secで全開 $Aco=1.8 \times 10^{-3}$   |
| ム                        | EV出口温度                                                                                                                                                                                                  | 325 °C    | EV出口放出弁          | 1~1.3secで全開 $Aco=4.36 \times 10^{-3}$ |
| 側                        |                                                                                                                                                                                                         |           | SH入口放出弁          | 1~1.3secで全開 $Aco=3.94 \times 10^{-3}$ |
| 水                        | 給水流量                                                                                                                                                                                                    | 1053 kg/s | SH出口放出弁          | 1~1.3secで全開 $Aco=4.41 \times 10^{-3}$ |
| ・                        | 給水温度                                                                                                                                                                                                    | 240 °C    | SH出口ドレン弁         | 2~38secで全開 $Aco=1.8 \times 10^{-3}$   |
| 蒸                        | EV出口温度                                                                                                                                                                                                  | 369 °C    | 気水分離器ドレン弁        |                                       |
| 気                        | SH入口温度                                                                                                                                                                                                  | 367 °C    | SH入口止弁出口放出弁      |                                       |
| 側                        | SH出口温度                                                                                                                                                                                                  | 487 °C    | EV出口安全弁          |                                       |
|                          | 主蒸気温度                                                                                                                                                                                                   | 483 °C    | SH出口安全弁          |                                       |
| SG廻り解析関連系統説明図            |                                                                                                                                                                                                         |           | SH出口逆止弁          | 逆流後閉止                                 |
| <p>N = ノード番号<br/>注意点</p> |                                                                                                                                                                                                         |           |                  |                                       |

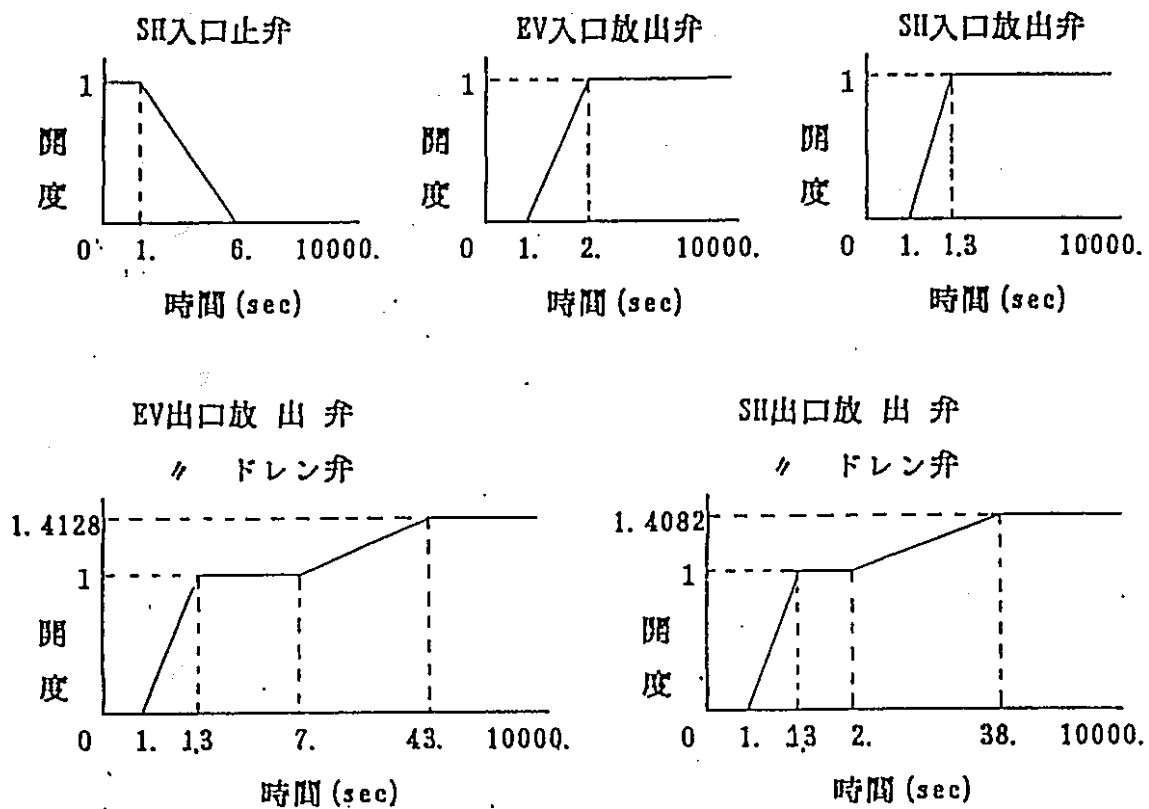


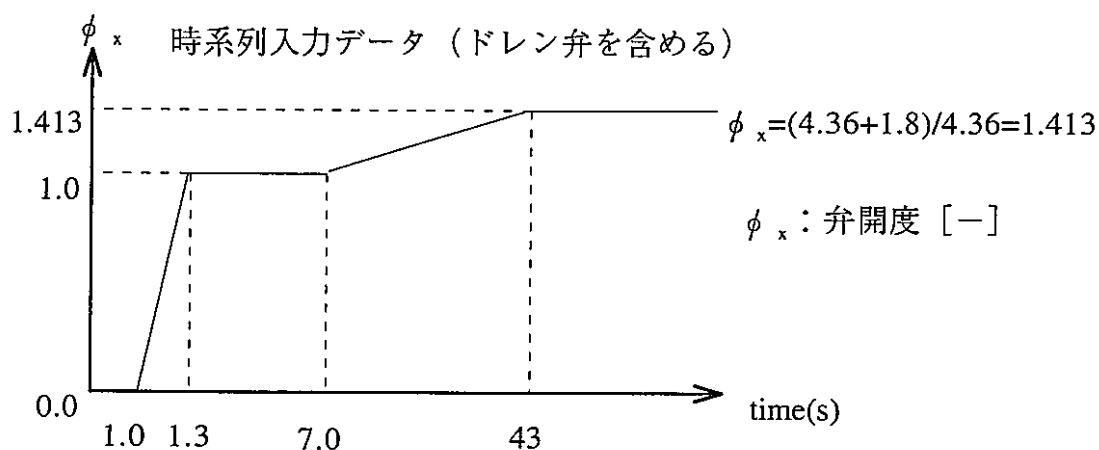
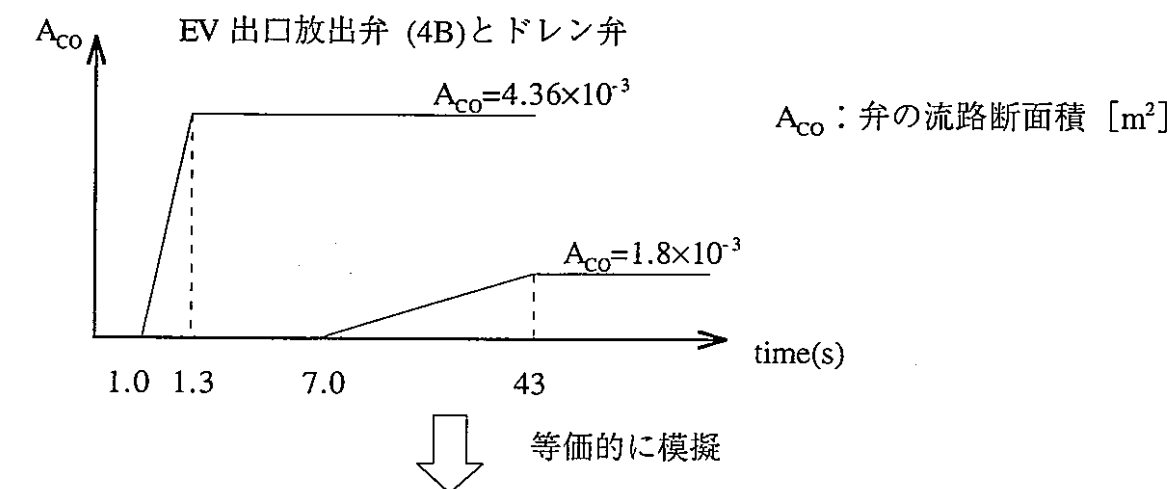
図 2.2-1 SG 周り制御弁の開度特性

### 2.3 解析ケース

主にブロー設備（放出弁容量、放出弁等開閉時刻）変更の影響を把握するための解析を実施した。実施した解析ケースと解析条件は表2.3-1 の通りである。なお、初期運転条件はケース 6 を除き定格出力とした。また、放出弁口径を大きくしたケースの計算では弁流路面積を現状設計の入力データの（口径比）<sup>2</sup> 倍して入力データとした。詳細は次葉の通り。



ケース 1 (基準) 定格、EV 入口放出弁 (3B)、EV 出口放出弁 (4B)



ケース 2 定格、EV 入口 3B、出口 6B

$$A_{co} = 4.36 \times 10^3 (6B/4B)^2 = 9.81 \times 10^{-3}$$

$$\phi_x = (A_{co} + 1.8 \times 10^{-3}) / A_{co} = 1.1835$$

ケース 3 定格、EV 入口 3B、出口 8B

$$A_{co} = 4.36 \times 10^3 (8B/4B)^2 = 17.44 \times 10^{-3}$$

$$\phi_x = (A_{co} + 1.8 \times 10^{-3}) / A_{co} = 1.1032$$

ケース 4 定格、EV 入口 4B、出口 6B

EV 出口側はケース 2 に同じ

EV 入口側は

$$A_{co} = 1.182 \times 10^3 (4B/3B)^2 = 2.1013 \times 10^{-3}$$

ケース 5 定格、EV 入口 4B、出口 8B

EV 出口側はケース 4 に同じ

EV 入口側はケース 3 に同じ

ケース 6 40%出力、EV 入口 3B、出口 4B

ケース 1 定格と対応する。

ケース 7、8 定格、EV 入口 3B、出口 4B

それぞれ弁の口径はケース 1 と同じ。ケース 7 の場合、EV 入口放出弁の開  
開始時刻だけをケース 1 より 10 秒遅らせたケース。

表2.3-1 解析ケースとブロー弁容量・運用条件

| 解析ケース       | EV 入口放出弁 | EV 出口放出弁 | その他                     |
|-------------|----------|----------|-------------------------|
| 1<br>(現状設計) | 3B       | 4B       |                         |
| 2           | 3B       | 6B       |                         |
| 3           | 3B       | 8B       |                         |
| 4           | 4B       | 6B       |                         |
| 5           | 4B       | 8B       |                         |
| 6<br>(現状設計) | 3B       | 4B       | 40%部分出力運転からのブロー         |
| 7           | 3B       | 4B       | EV 入口放出弁開時刻を10 sec 遅らせる |
| 8           | 3B       | 4B       | SH入口止弁の閉時刻を10 sec 遅らせる  |

## 2.4 解析結果

解析結果のうち次の諸量の結果を各ケースごとに示す。

なお、設備変更の影響が把握し易いよう、結果はケース 1 のものと比較する形で示した。

・各ケースと図番号の対比は以下の通り。

ケース 1、ケース 2 …… 図2.4 (1) - N

ケース 3 …… 図2.4 (3) - N

⋮

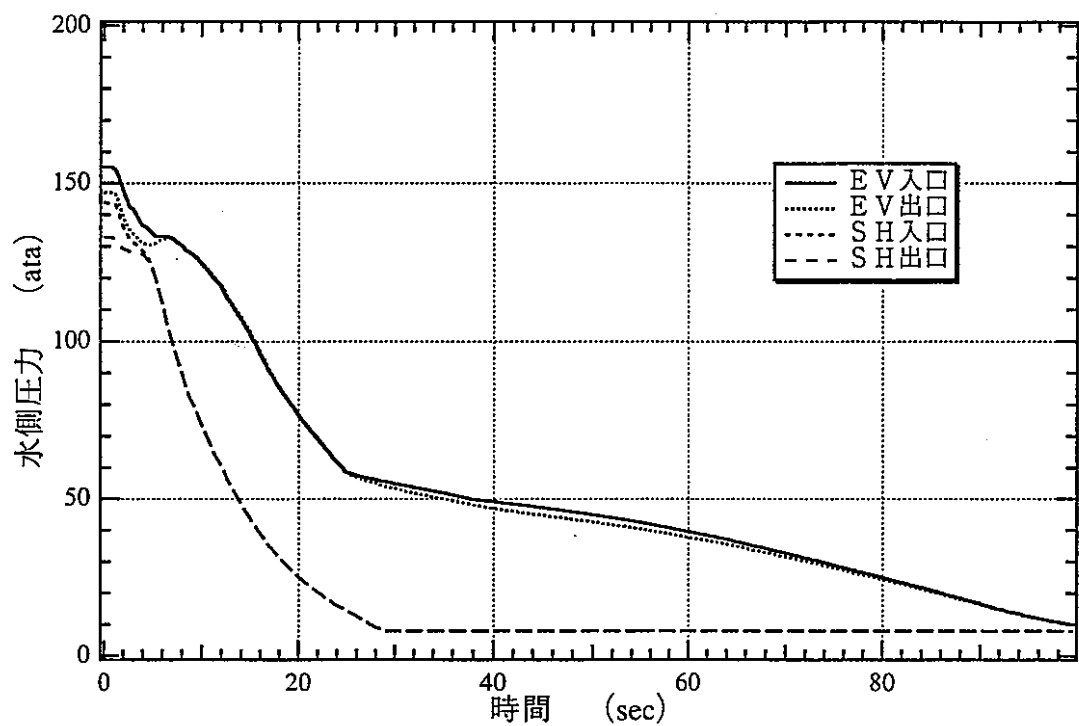
⋮

ケース 8 …… 図2.4 (8) - N

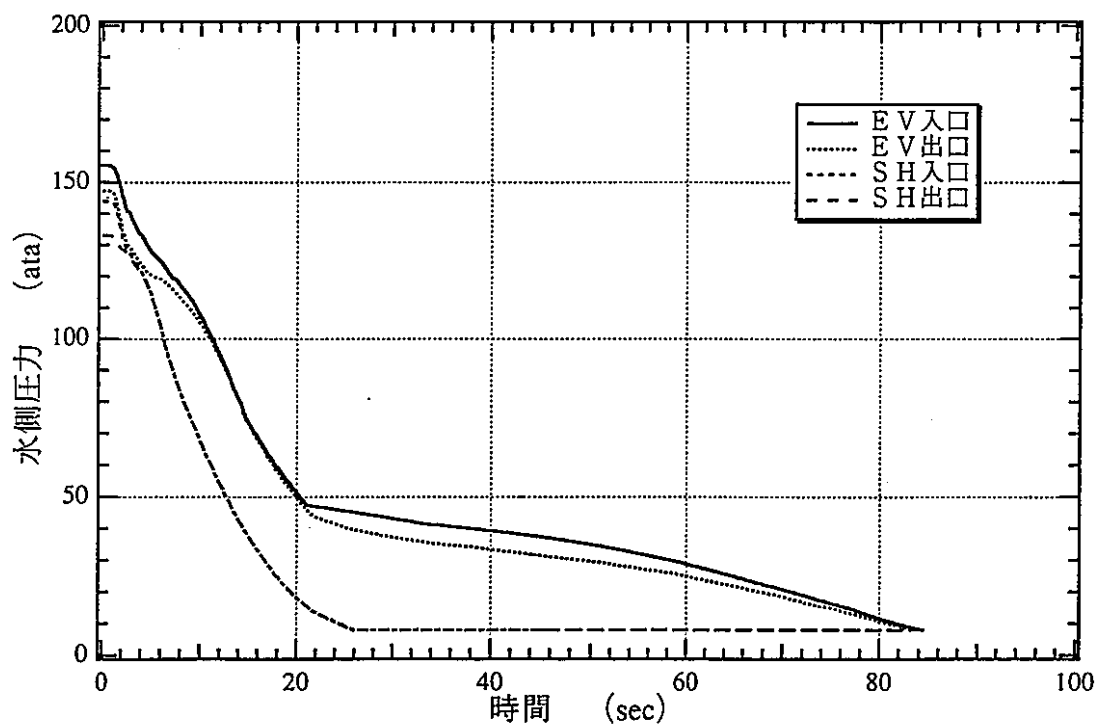
但し、N は次の諸量と示す。

- 1: SG 出入口圧力変化
- 2: SG 出入口放出弁流量
- 3: EV コイル下部流量変化
- 4: EV コイル上部流量変化
- 5: SH コイル部流量変化
- 6: SH コイル部流量変化 (流量のスケール拡大)
- 7: EV コイル下部温度変化\*
- 8: EV コイル上部温度変化\*
- 9: EV コイル下部熱伝達係数\*
- 10: EV コイル上部熱伝達係数\*

\* これらは BLOOPHによる解析結果そのものであり、温度補正前の値である。これらの温度補正結果については、第 3 章に示す。

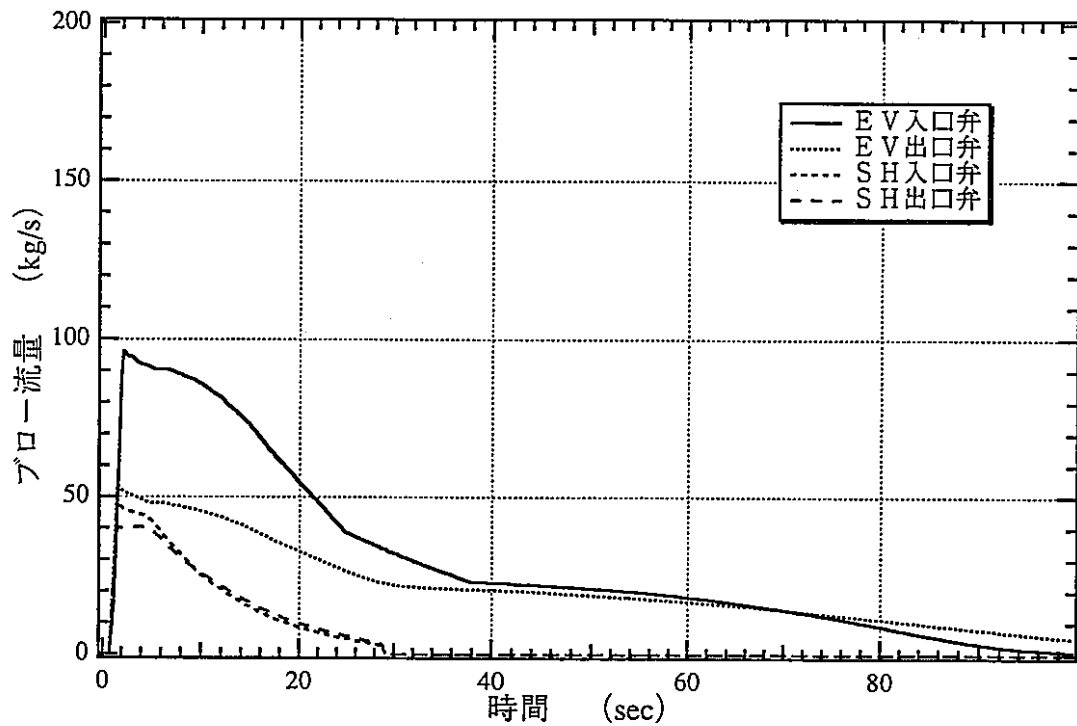


ケース1 (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

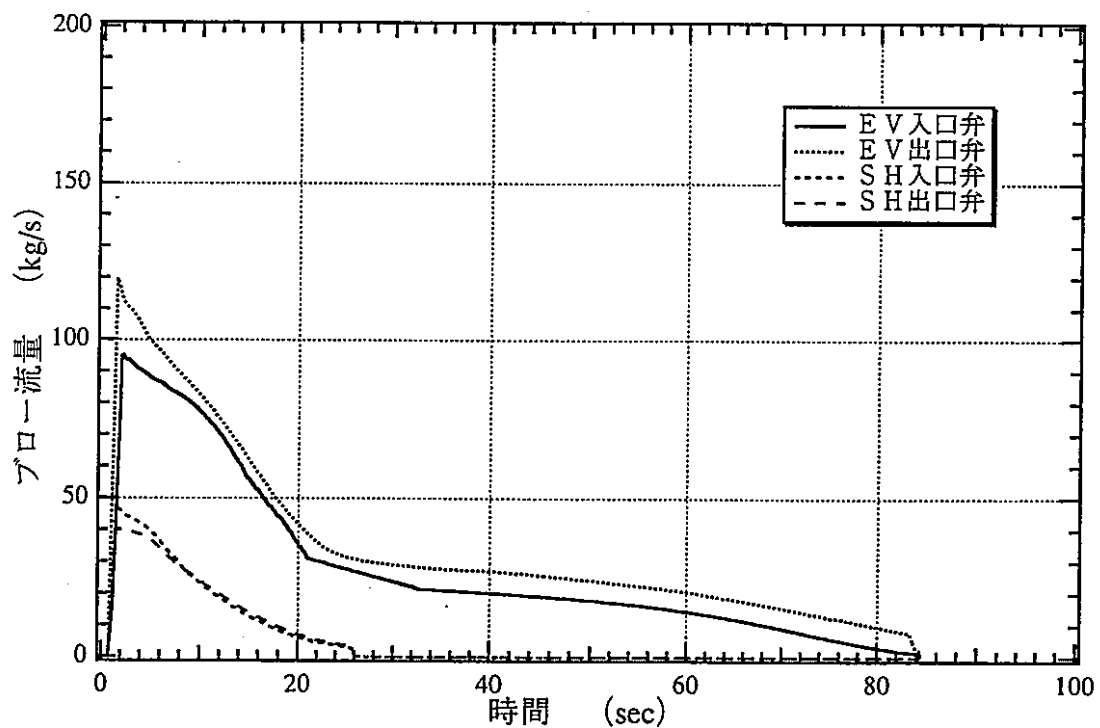


ケース2 (EV入口弁3B、EV出口弁 6B)

図2.4(1)-1 SG 出入口圧力変化 (定格運転状態からのブロー)

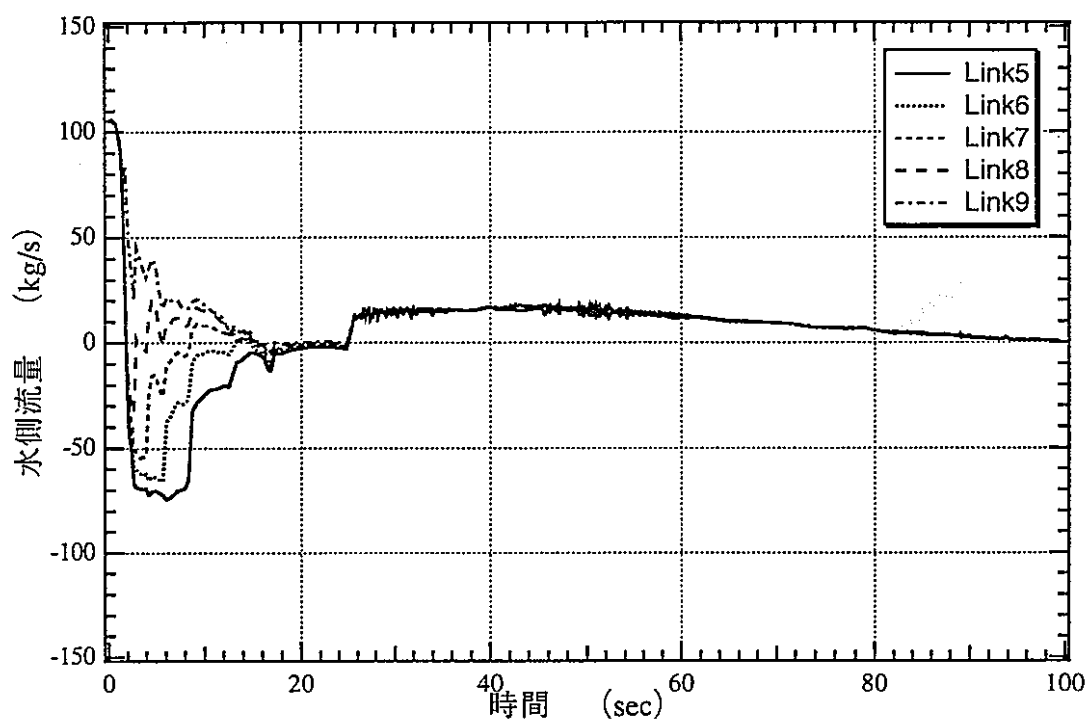


ケース1 (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

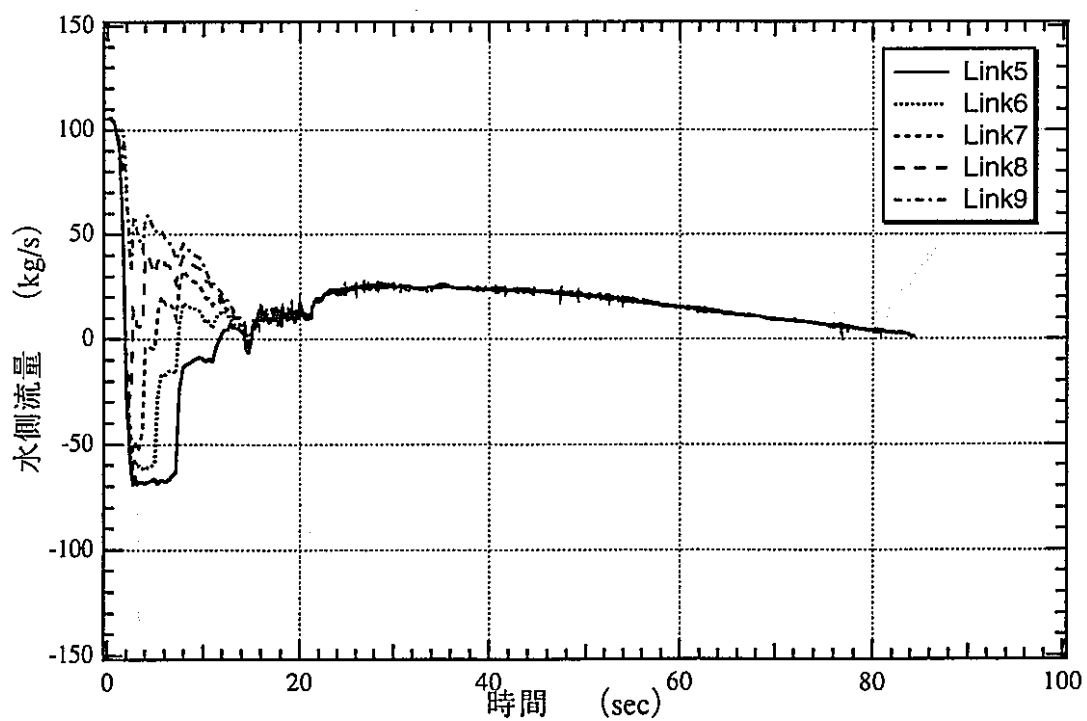


ケース2 (EV入口弁3B、EV出口弁 6B)

図2.4(1)-2 SG 出入口放出弁流量 (定格運転状態からのブロー)

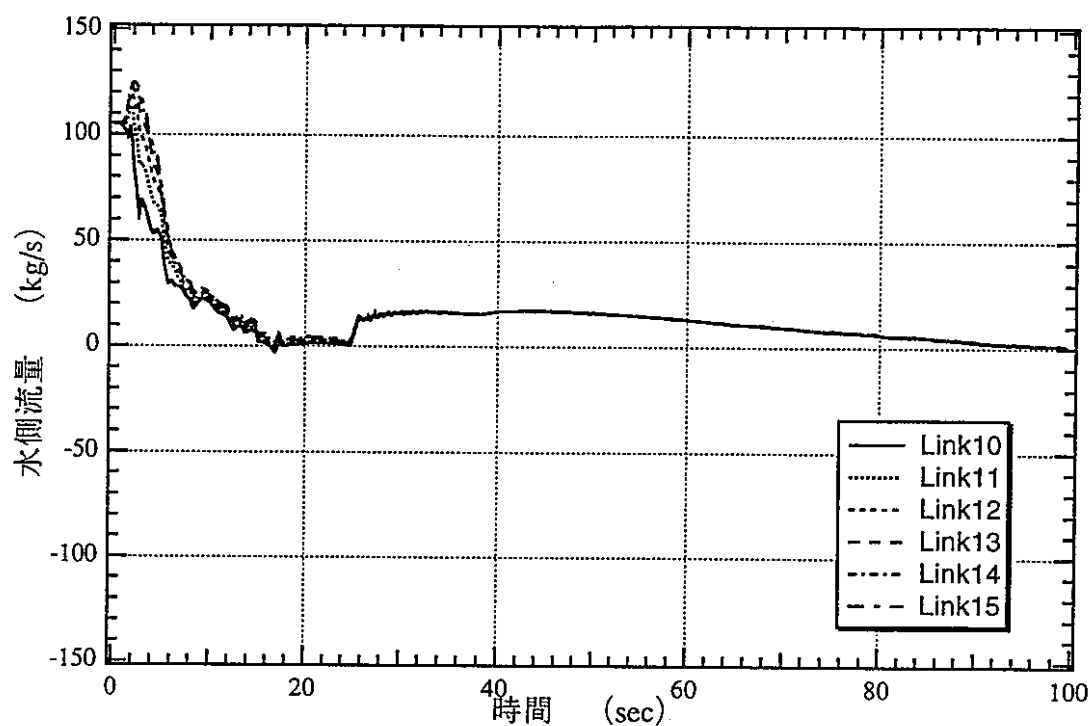


ケース1 (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

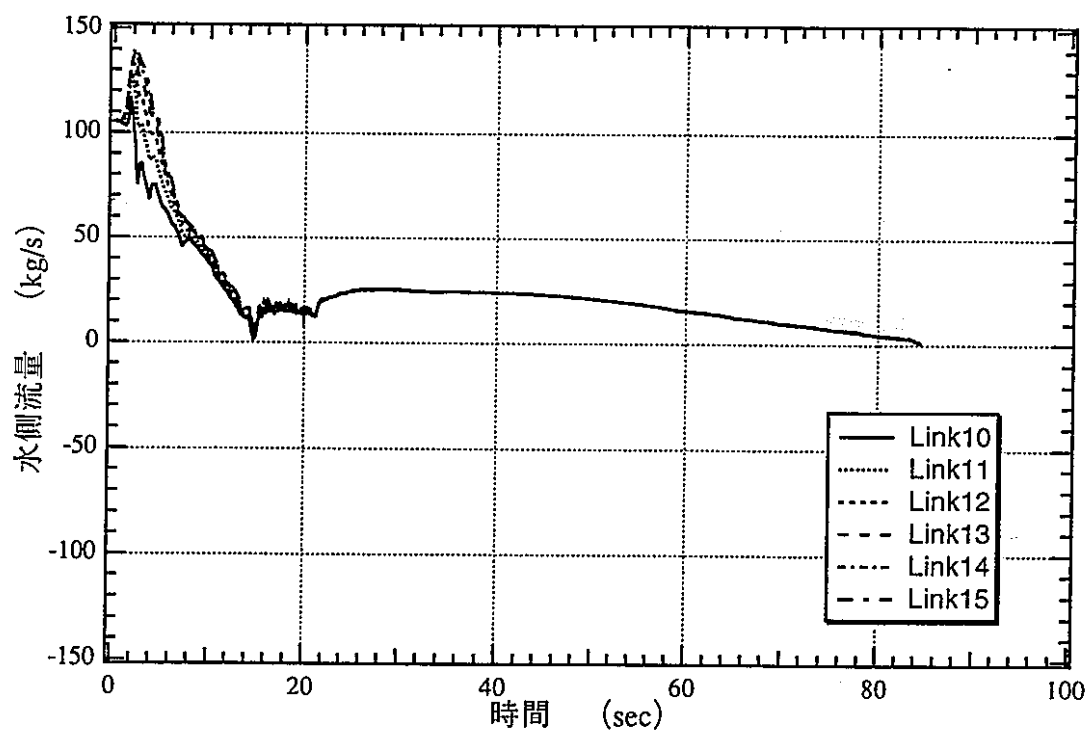


ケース2 (EV入口弁3B、EV出口弁 6B)

図2.4(1)-3 EV コイル下部流量変化 (定格運転状態からのブロー)

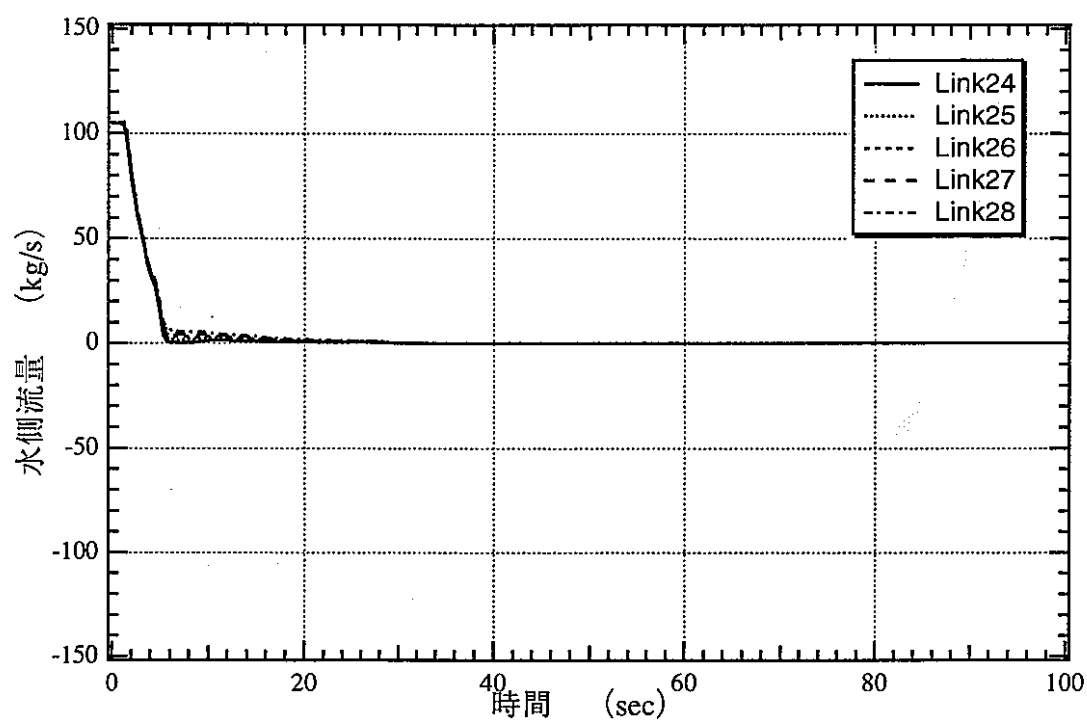


ケース1 (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

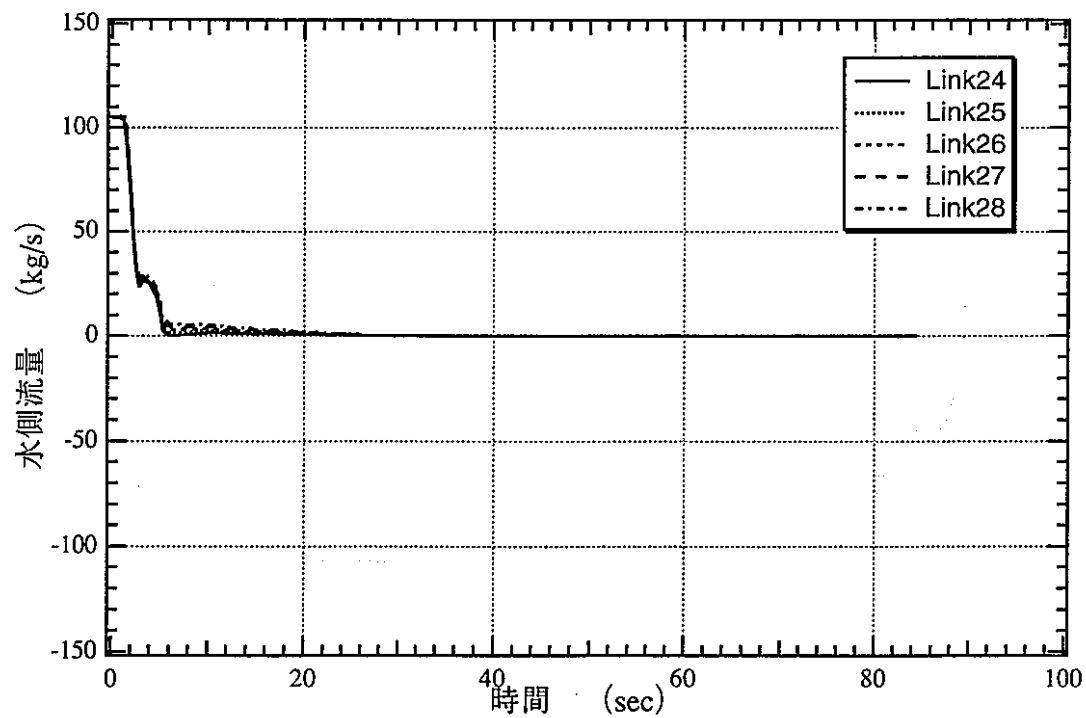


ケース2 (EV入口弁3B、EV出口弁 6B)

図2.4(1)-4 EV 管束部上部流量変化 (定格運転状態からのフロー)



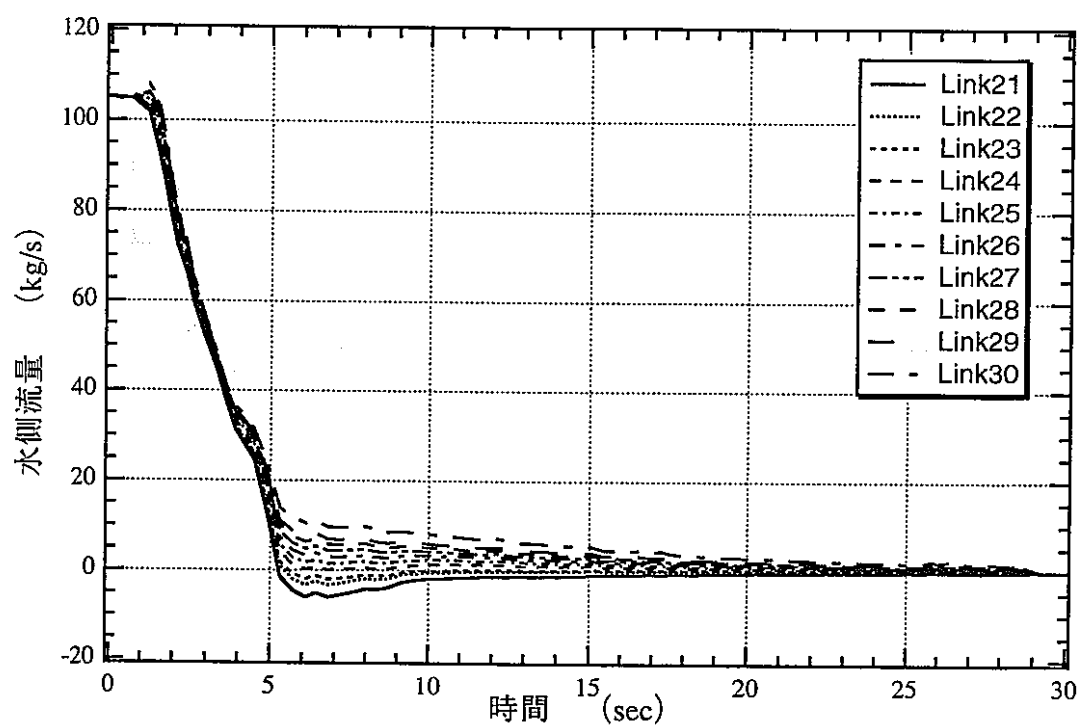
ケース 1 (BLOPH)



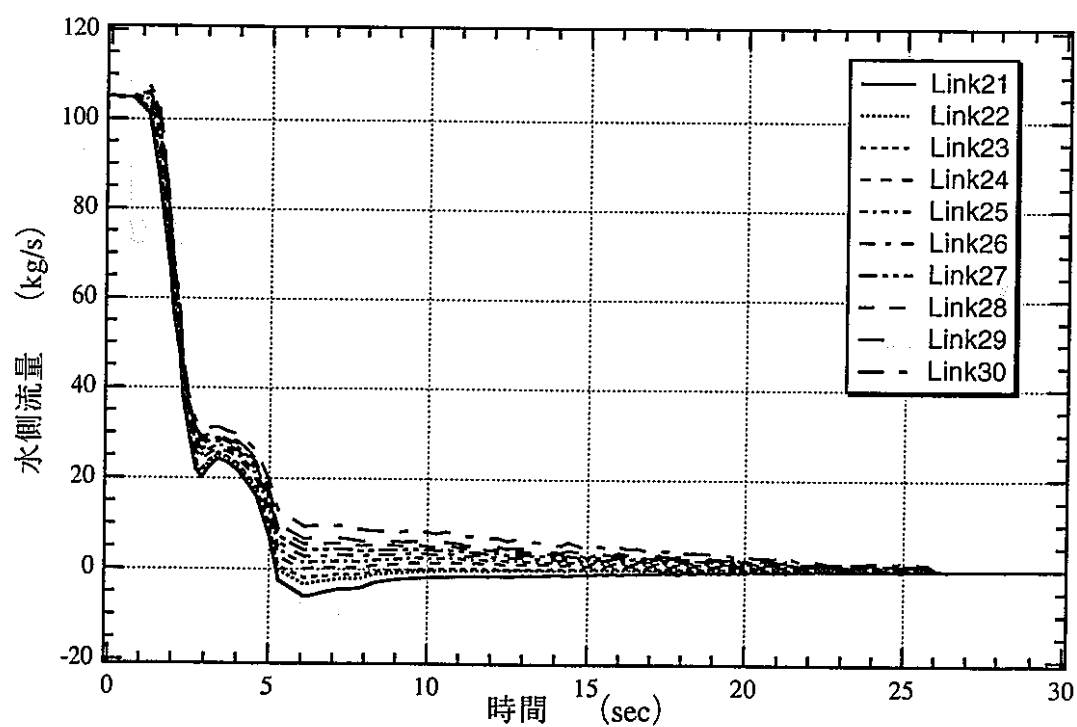
ケース2 (BLOPH)

図2.4(1)-5 SH コイル流量変化 (定格運転状態からのブロー)



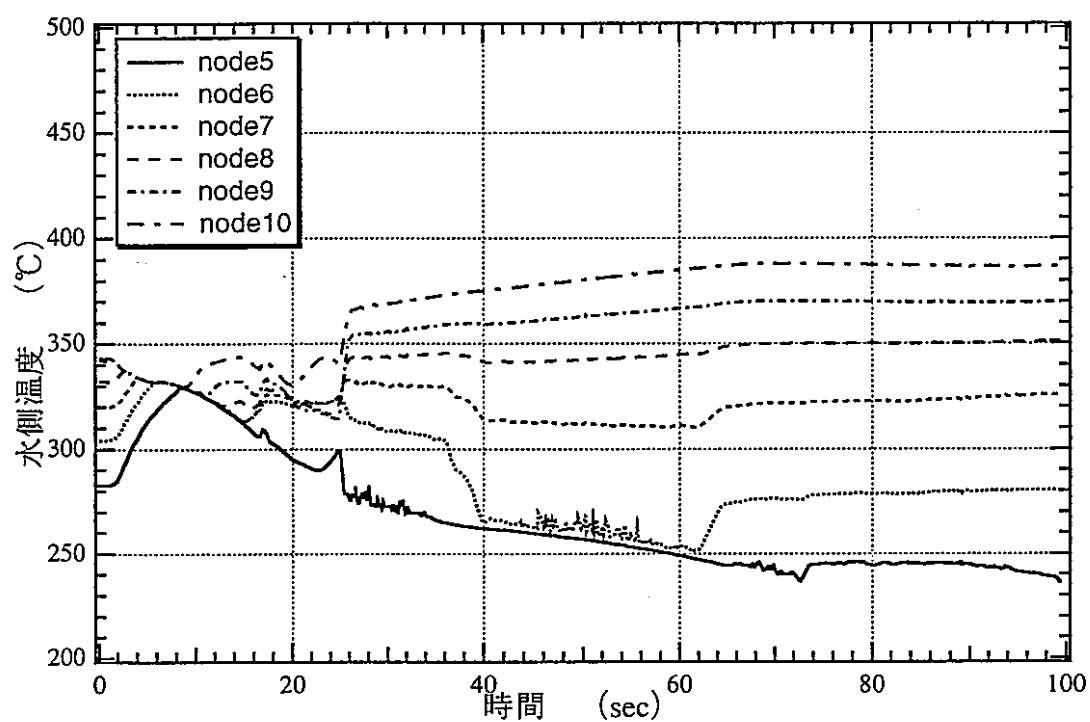


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

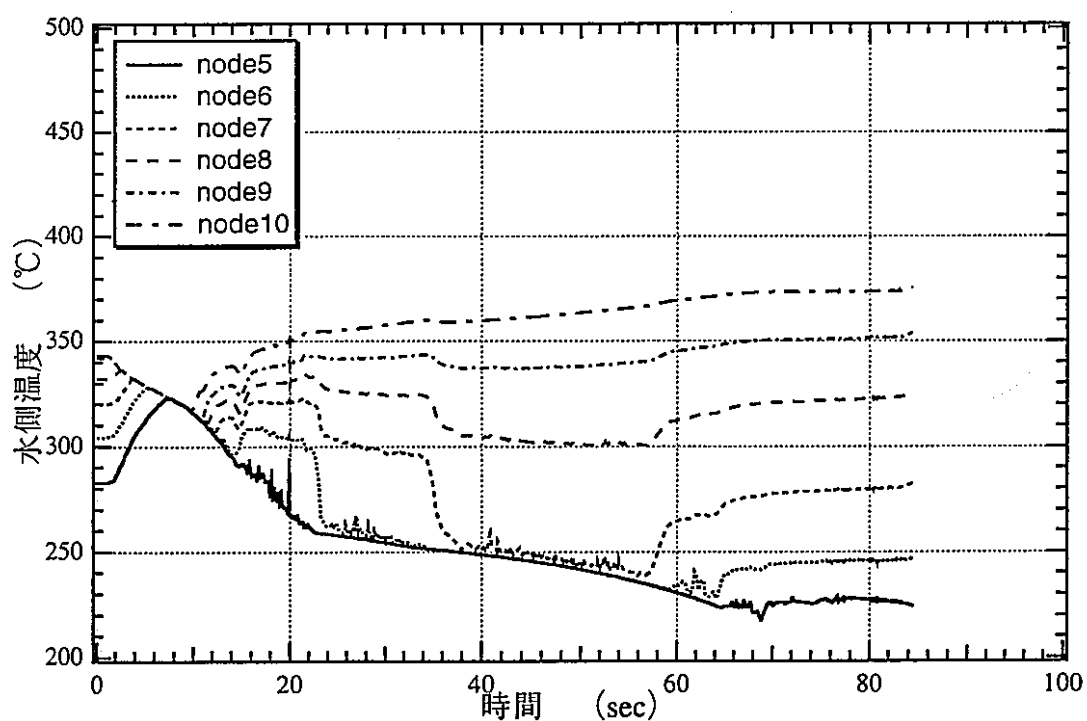


ケース2 (EV入口弁3B、EV出口弁6B)

図2.4(1)-6 SH コイル部流量変化 (定格運転状態からのブロー)

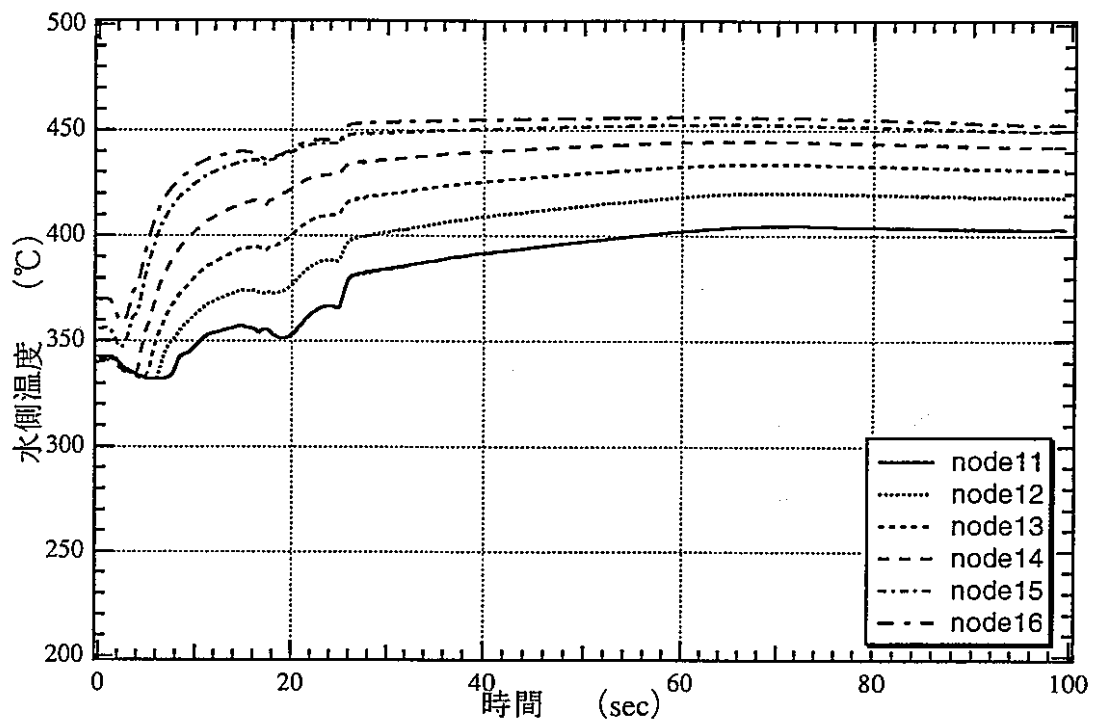


ケース1 (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

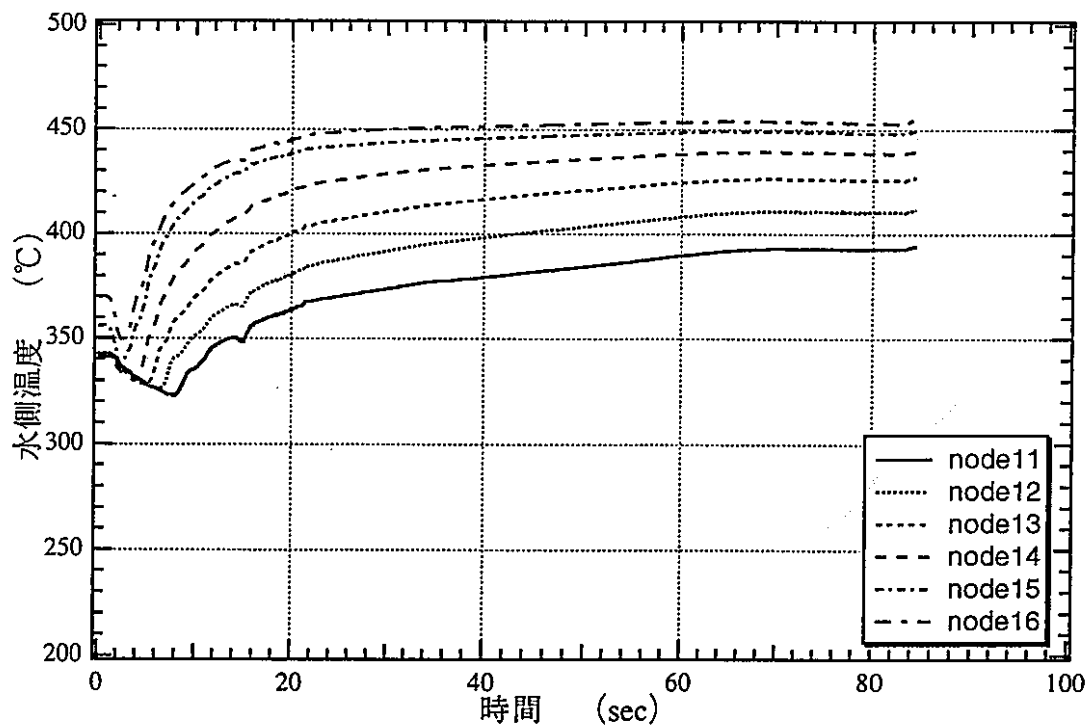


ケース2 (EV入口弁3B、EV出口弁 6B)

図2.4(1)-7 EV コイル下部温度変化 (定格運転状態からのブロー)

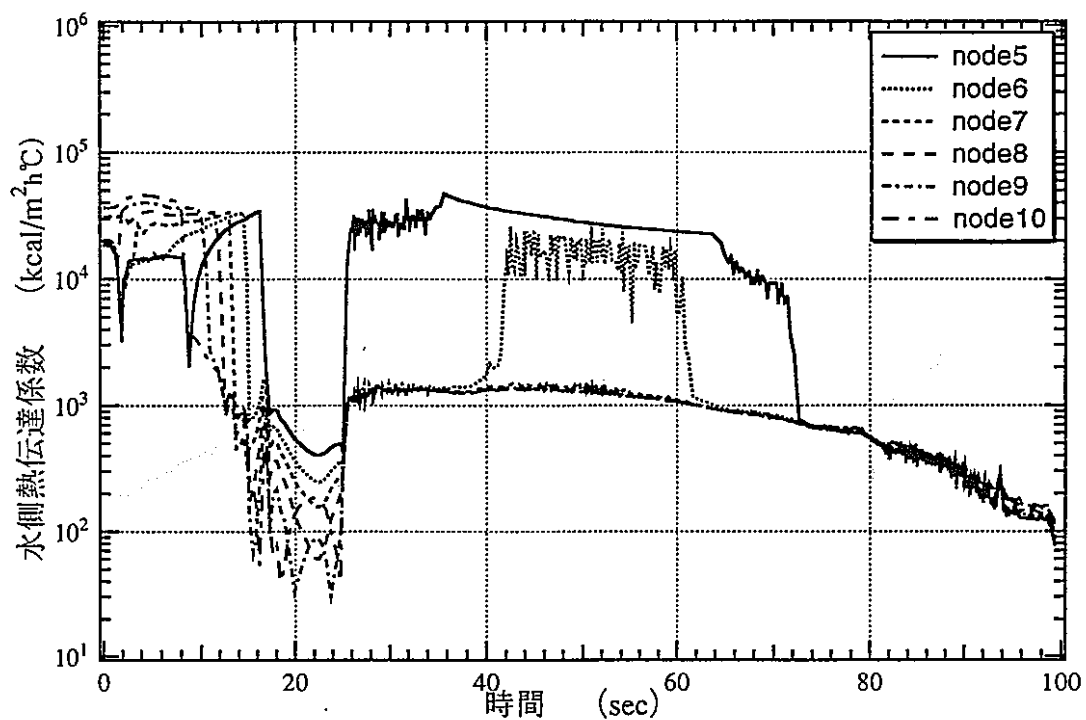


ケース1 (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

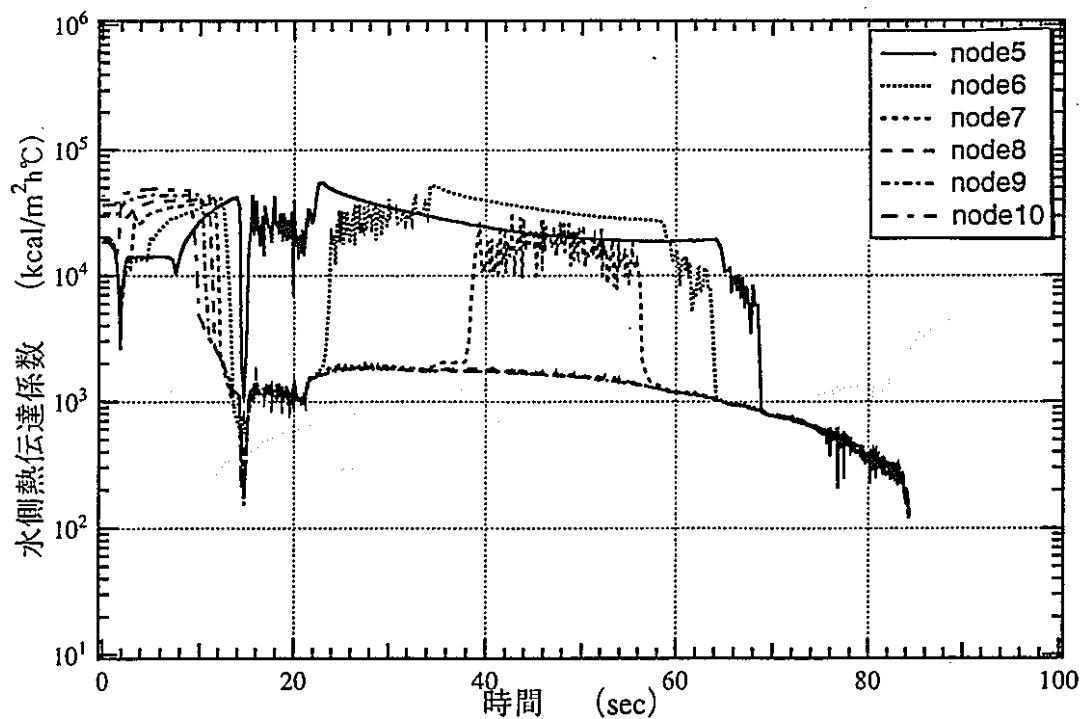


ケース2 (EV入口弁3B、EV出口弁 6B)

図2.4(1)-8 EV コイル上部温度変化 (定格運転状態からのブロー)

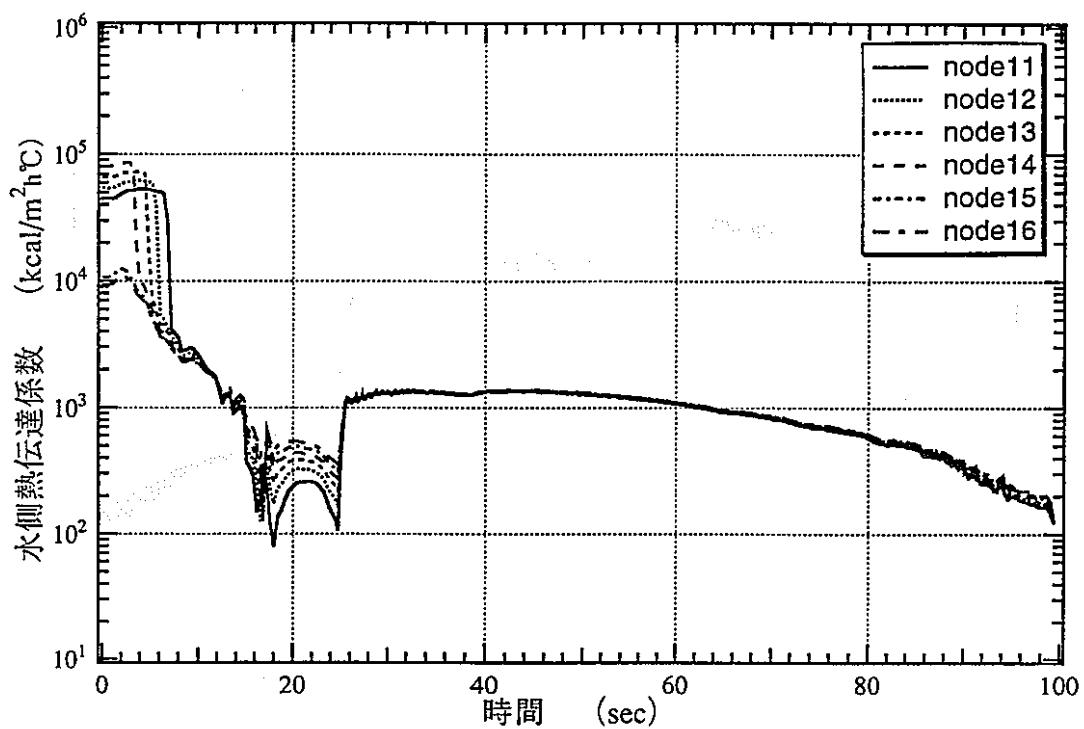


ケース1 (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

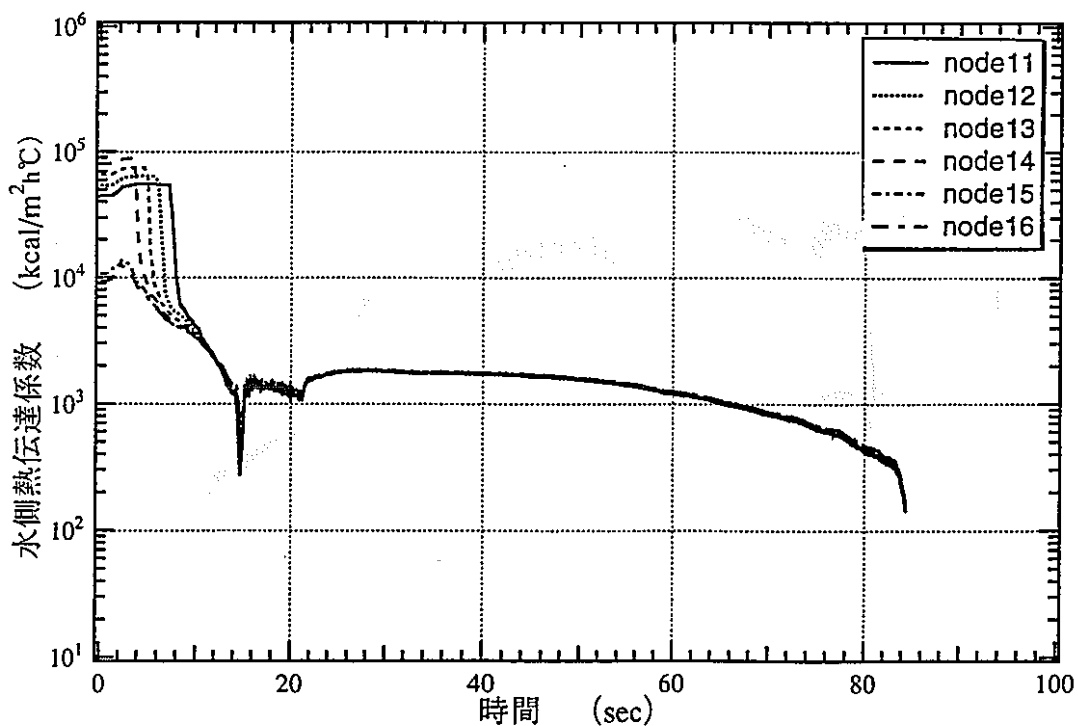


ケース2 (EV入口弁3B、EV出口弁 6B)

図2.4(1)-9 EV コイル下部熱伝達係数変化 (定格運転状態からのブロー)

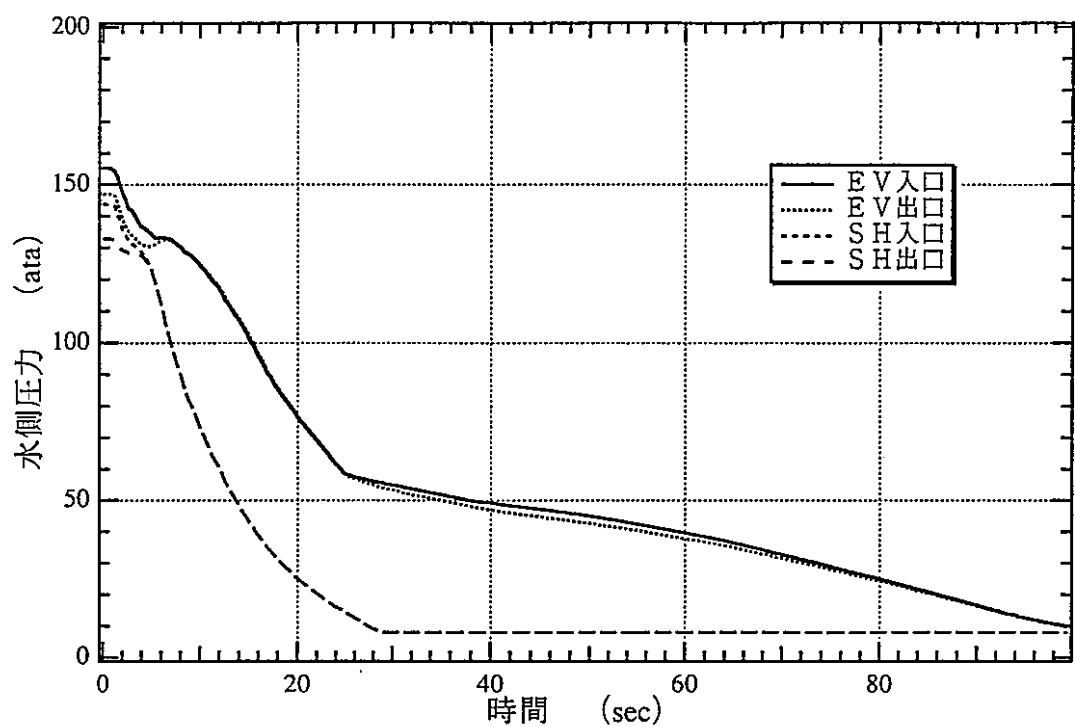


ケース1 (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

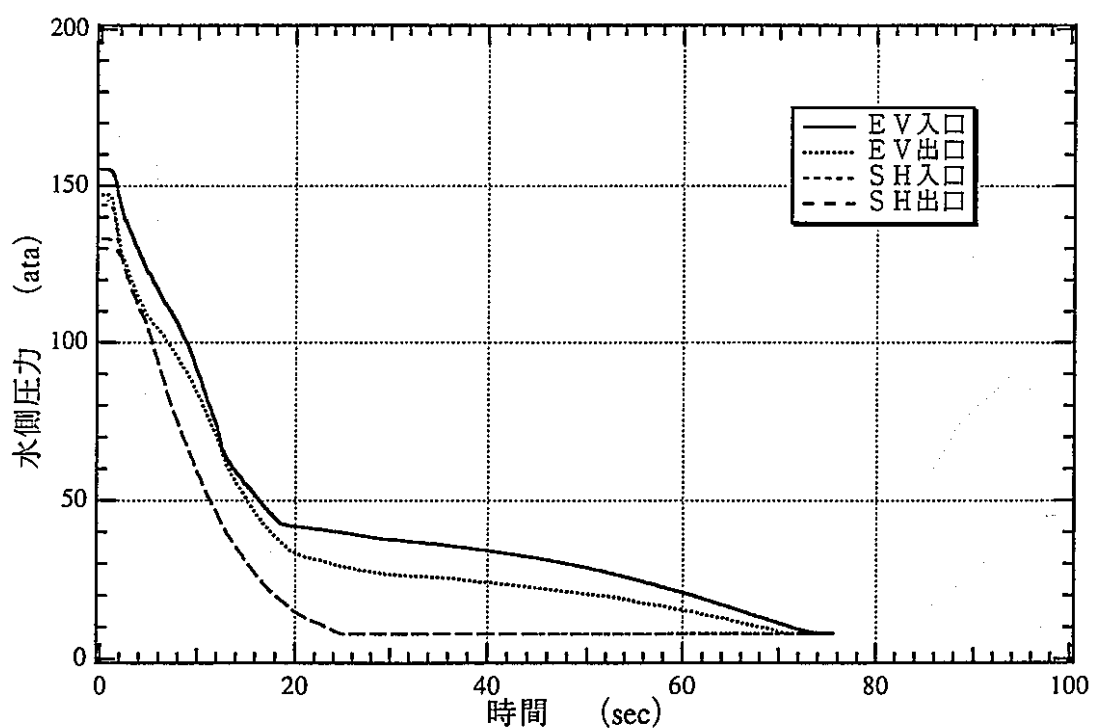


ケース2 (EV入口弁3B、EV出口弁 6B)

図2.4(1)-10 EV コイル下部熱伝達係数変化 (定格運転状態からのブロー)

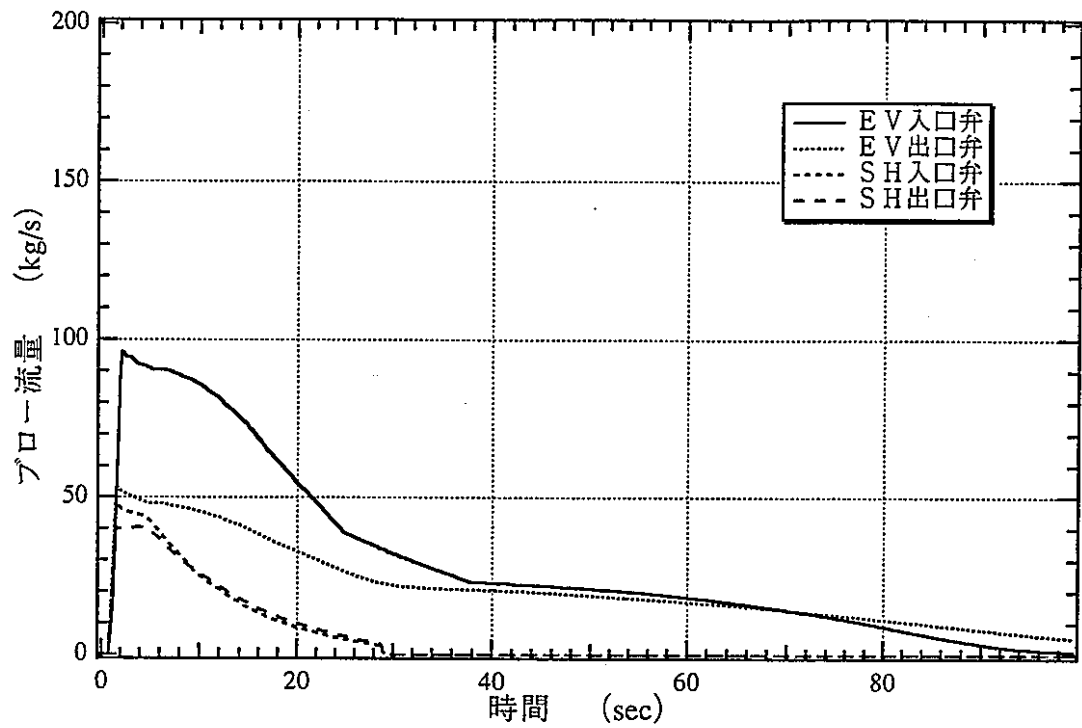


ケース1 (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

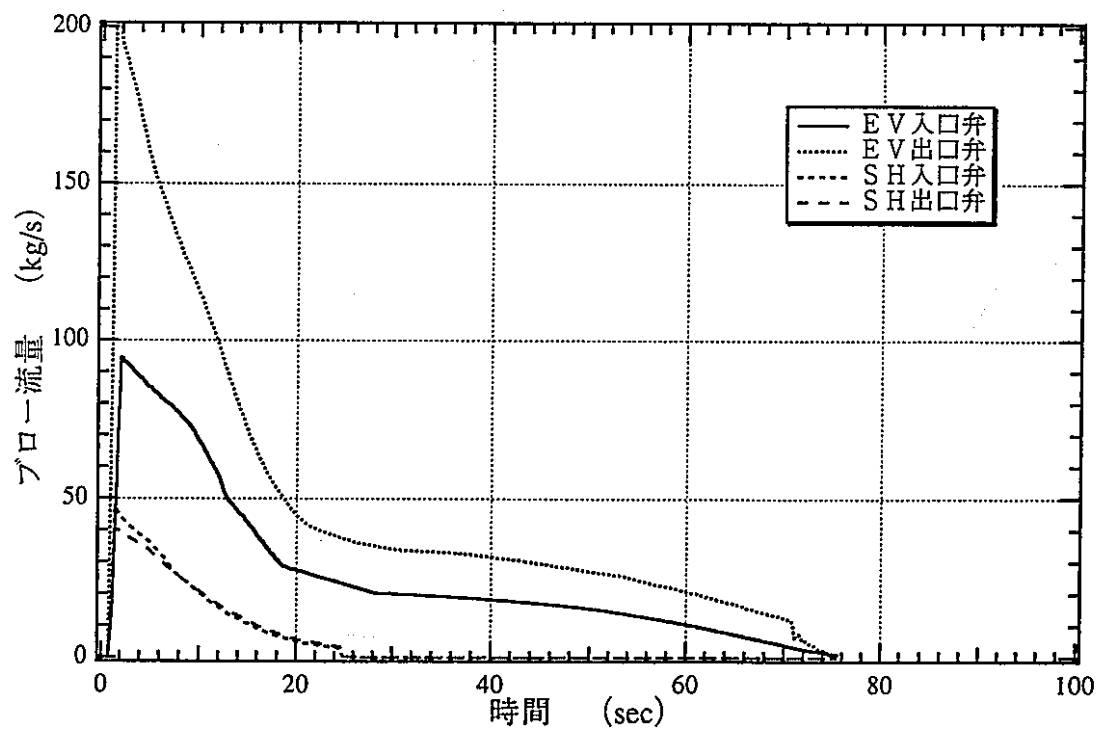


ケース3 (EV入口弁3B、EV出口弁 8B)

図2.4(3)-1 SG 出入口圧力変化 (定格運転状態からのブロー)

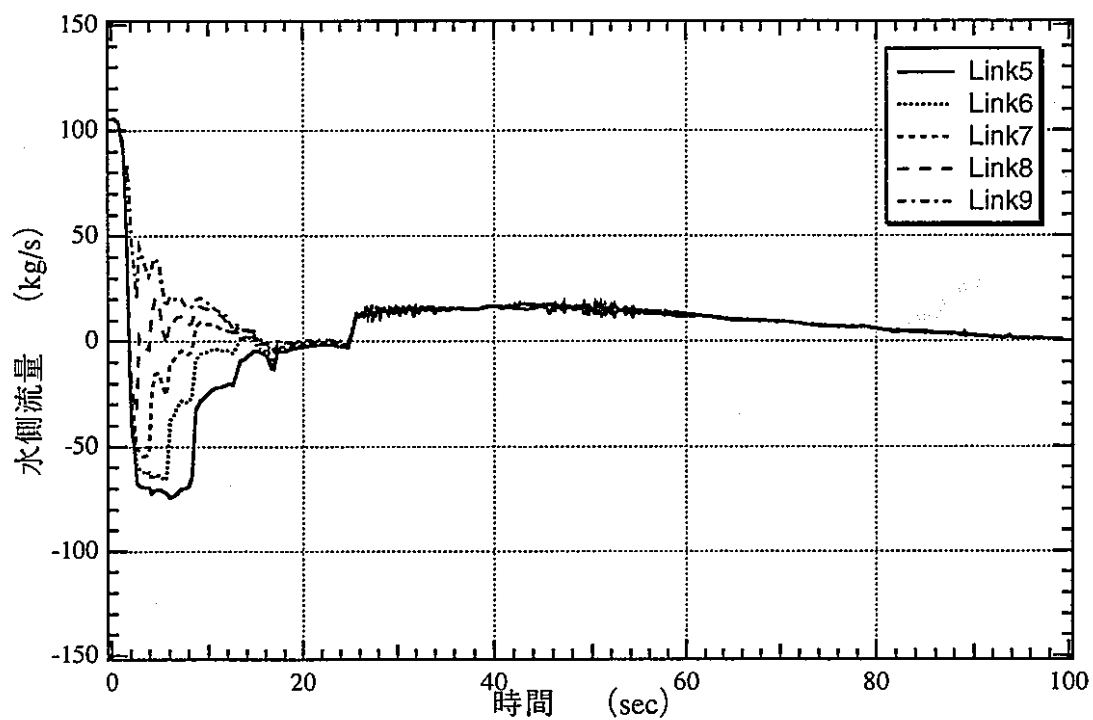


ケース1 (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

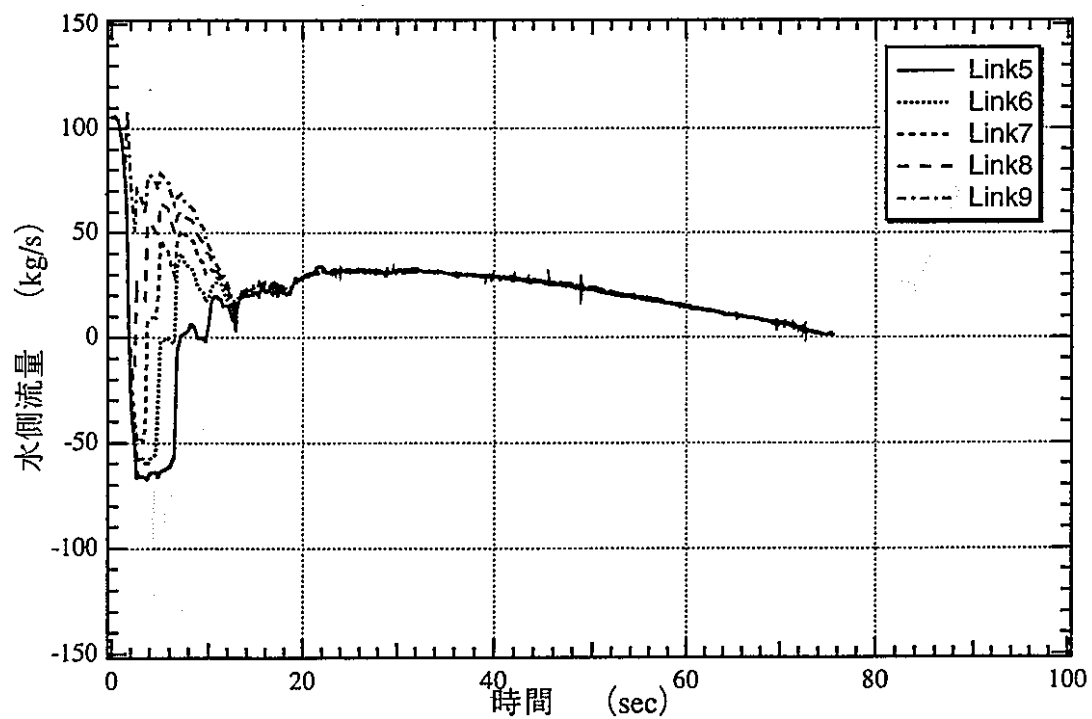


ケース3 (EV入口弁3B、EV出口弁 8B)

図2.4(3)-2 SG 出入口放出弁流量 (定格運転状態からのブロー)



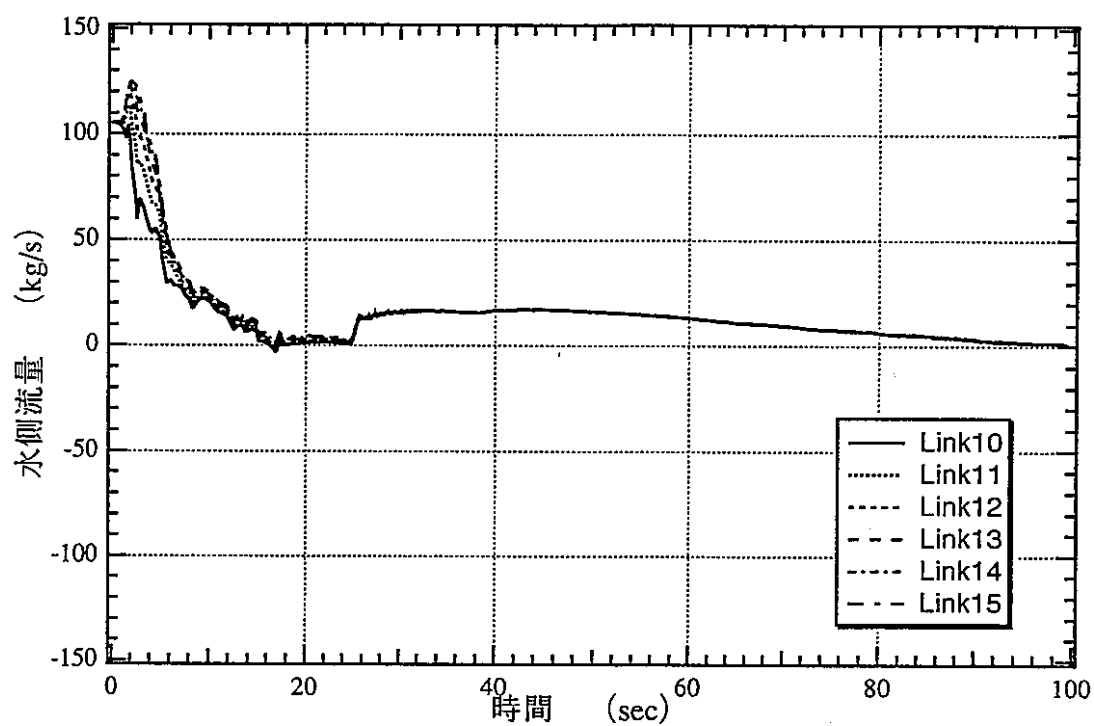
ケース1 (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)



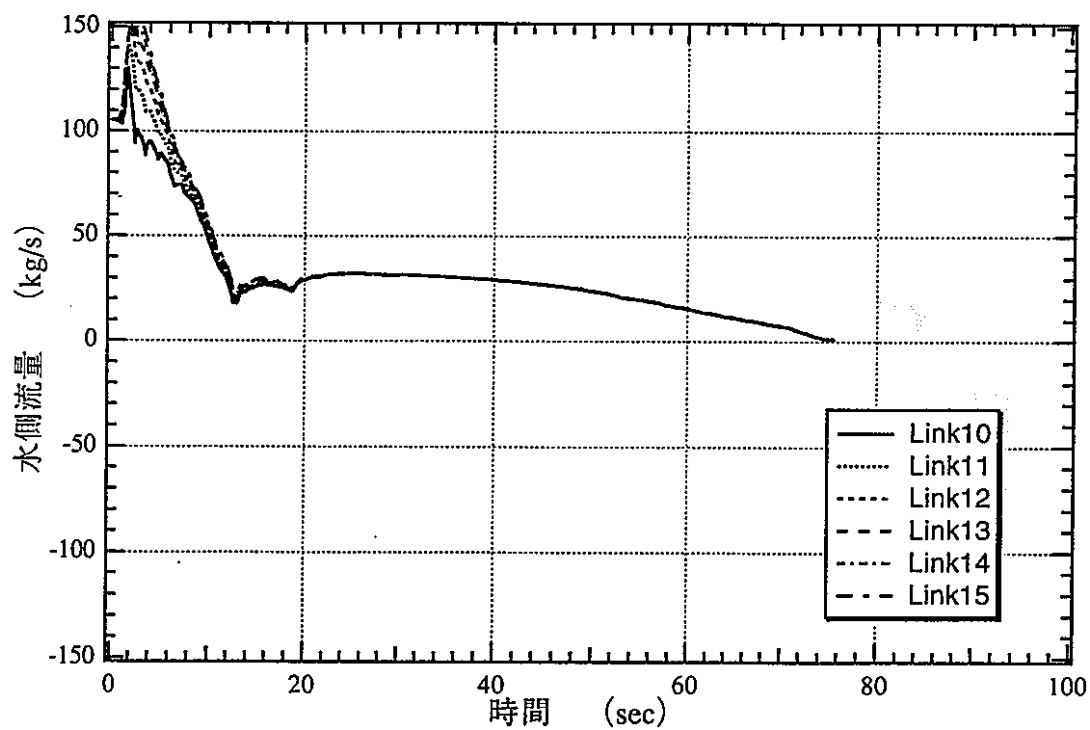
ケース3 (EV入口弁3B、EV出口弁 8B)

図2.4(3)-3 EV コイル下部流量変化 (定格運転状態からのブロー)



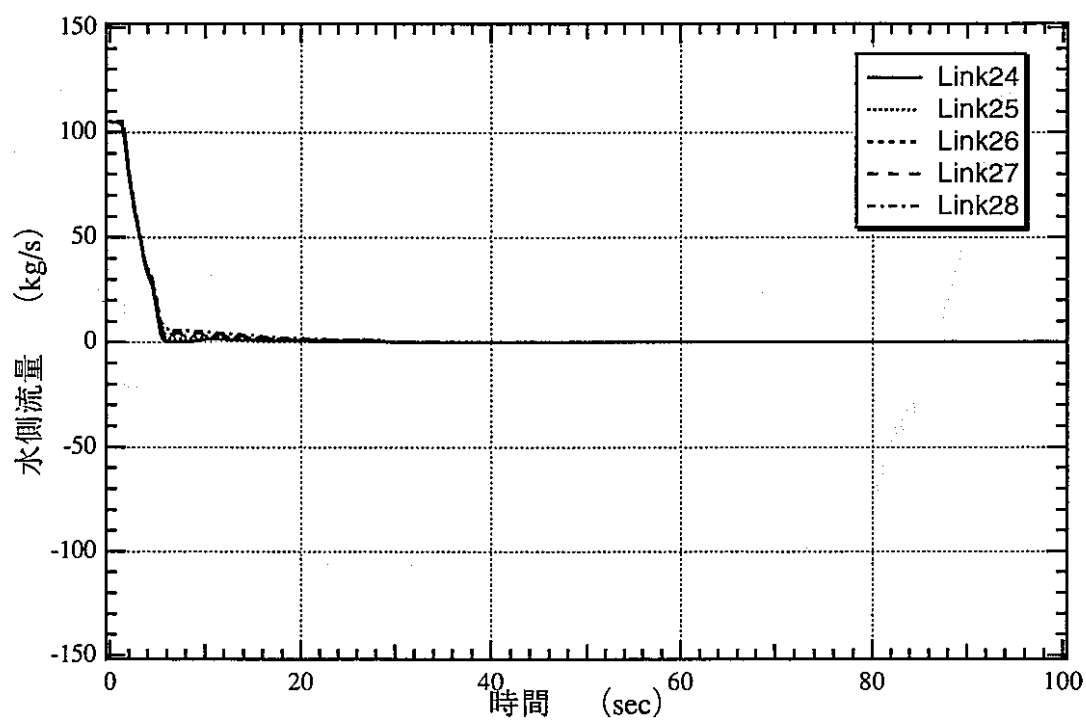


ケース1 (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

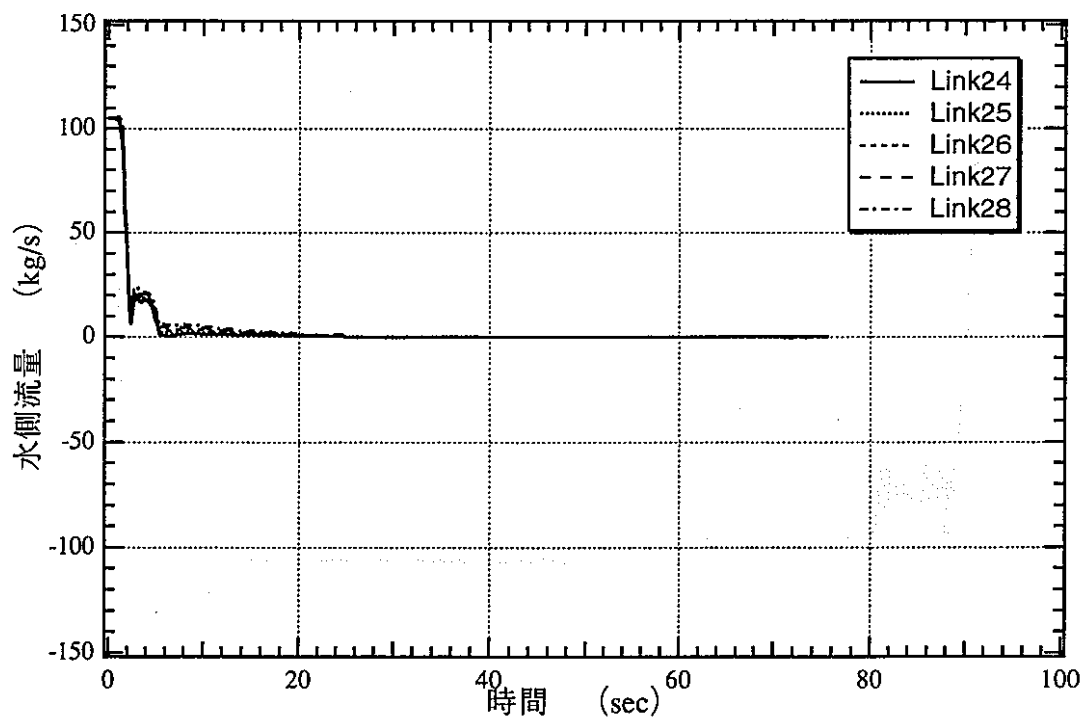


ケース3 (EV入口弁3B、EV出口弁 8B)

図2.4(3)-4 EV 管東部上部流量変化 (定格運転状態からのブロー)

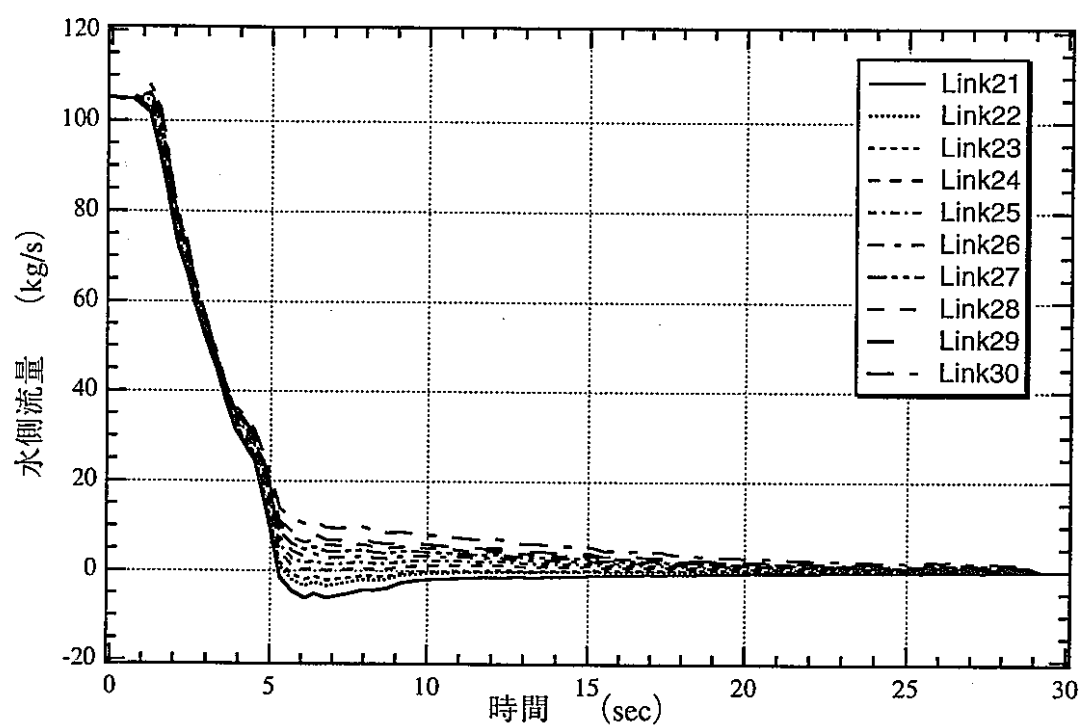


ケース 1 (BLOOPH)

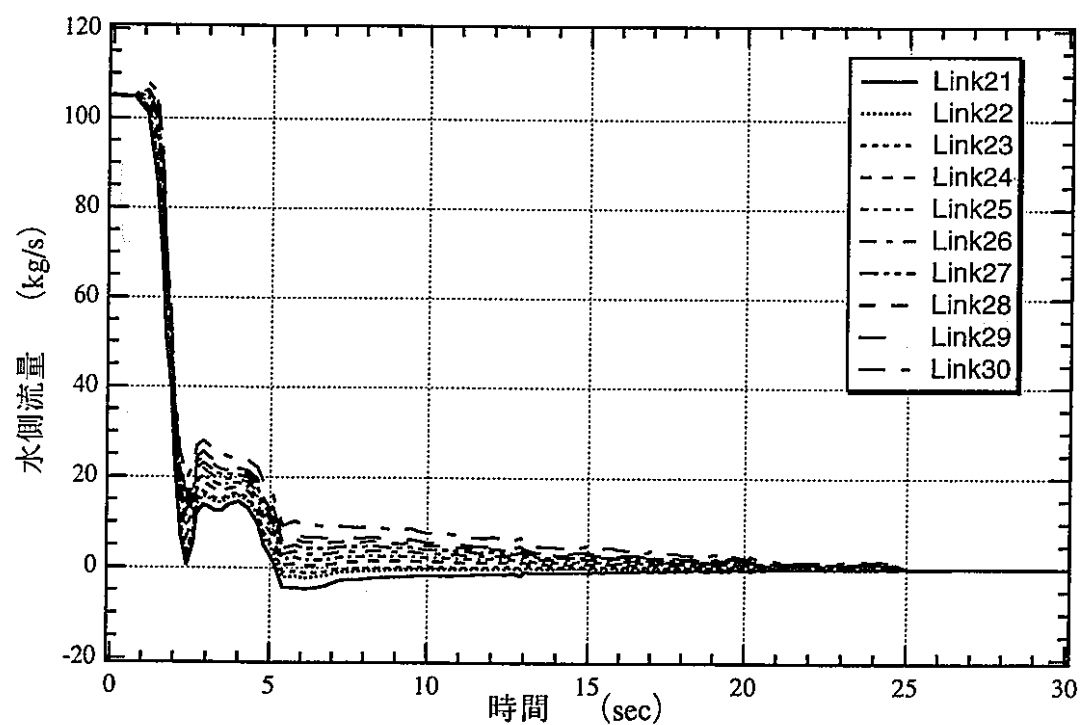


ケース3 (BLOOPH)

図2.4(3)-5 SH コイル流量変化 (定格運転状態からのブロー)

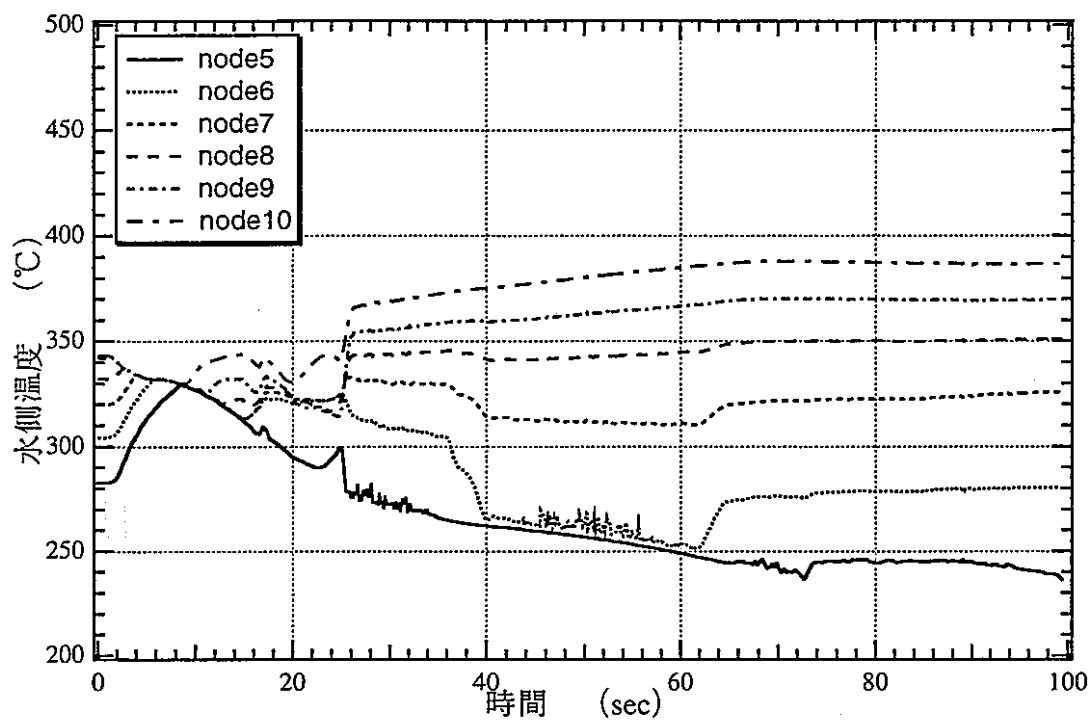


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

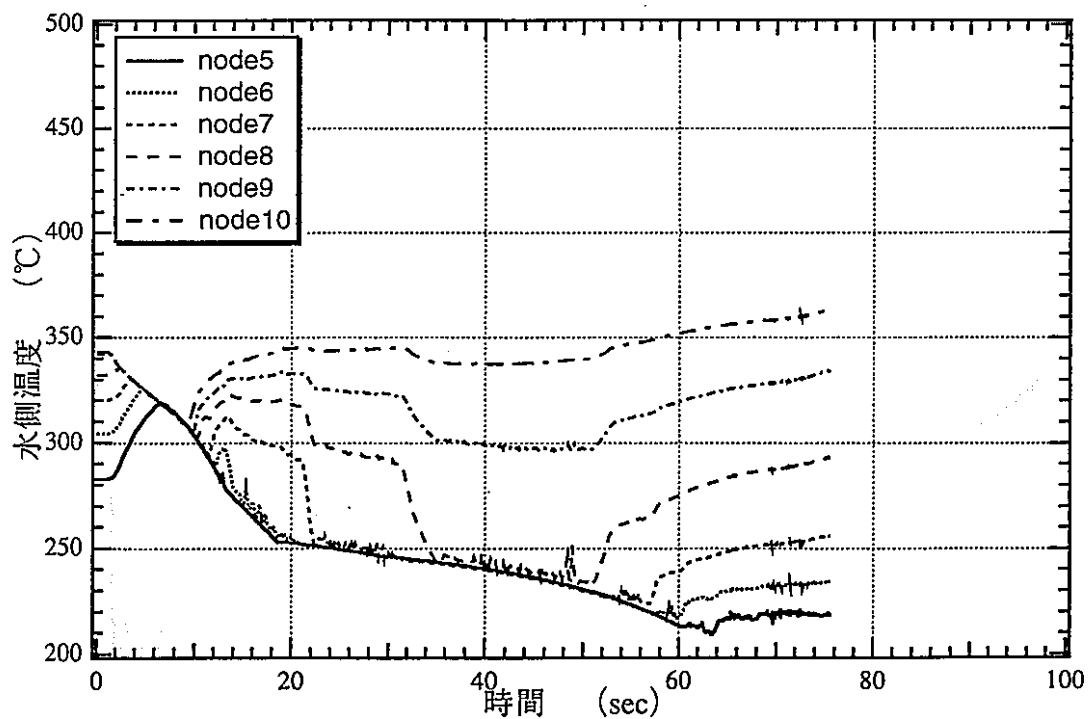


ケース3 (EV入口弁3B、EV出口弁8B)

図2.4(3)-6 SH コイル部流量変化 (定格運転状態からのブロー)

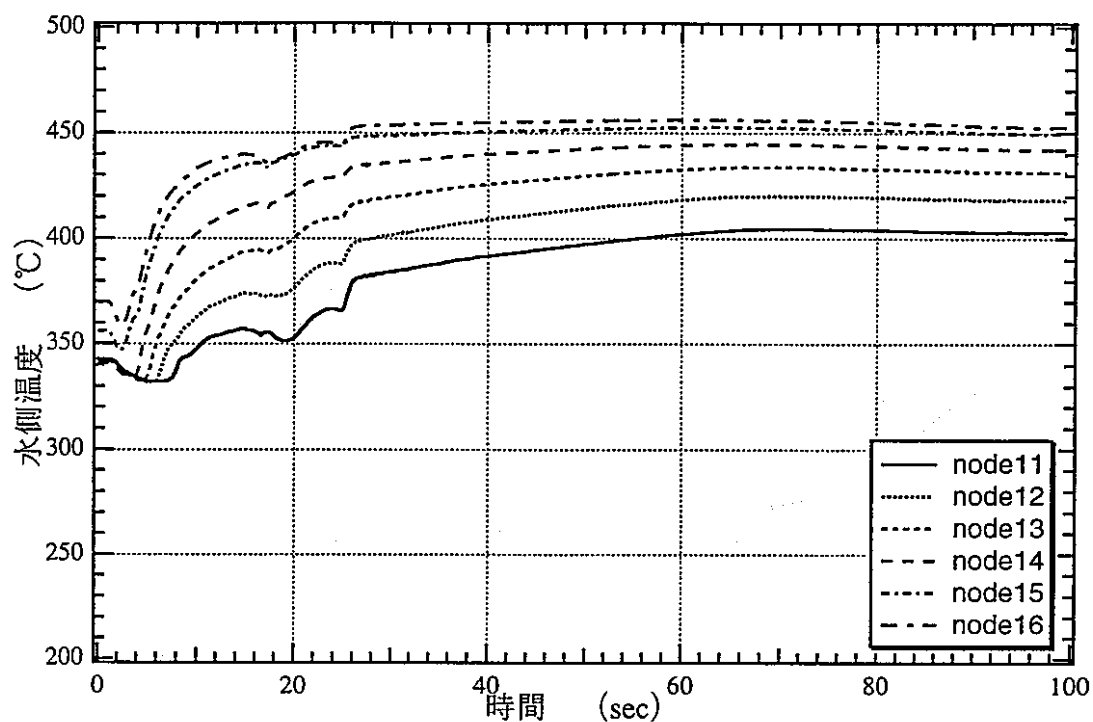


ケース1 (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

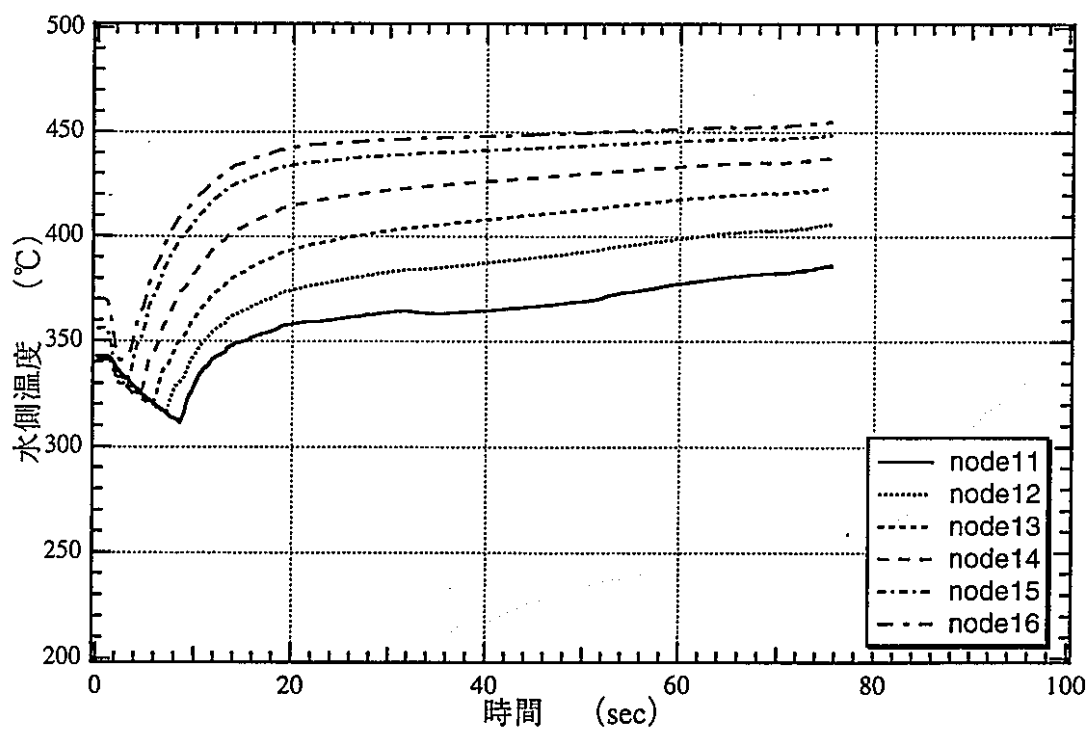


ケース3 (EV入口弁3B、EV出口弁 8B)

図2.4(3)-7 EV コイル下部温度変化 (定格運転状態からのブロー)

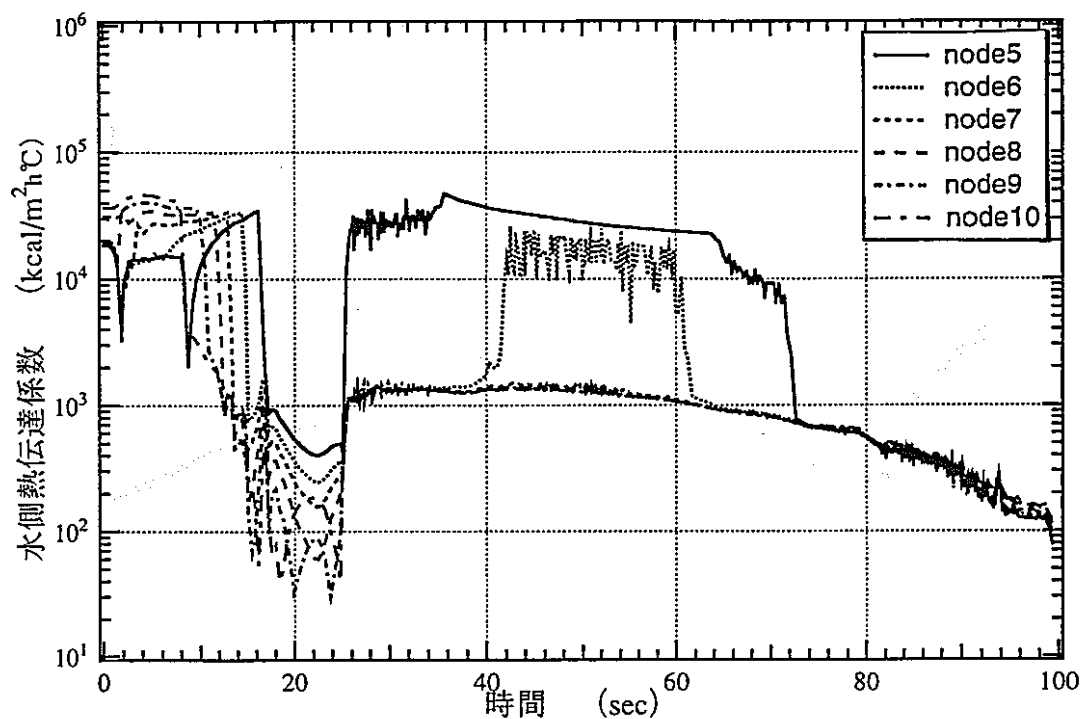


ケース1 (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

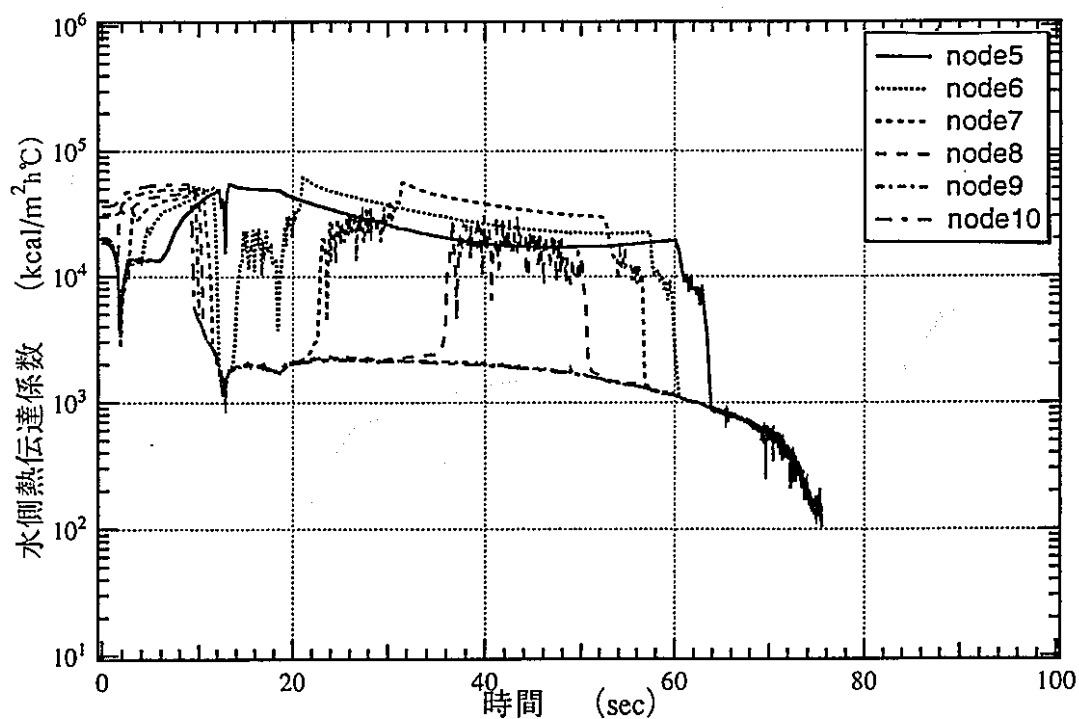


ケース3 (EV入口弁3B、EV出口弁 8B)

図2.4(3)-8 EV コイル上部温度変化 (定格運転状態からのブロー)

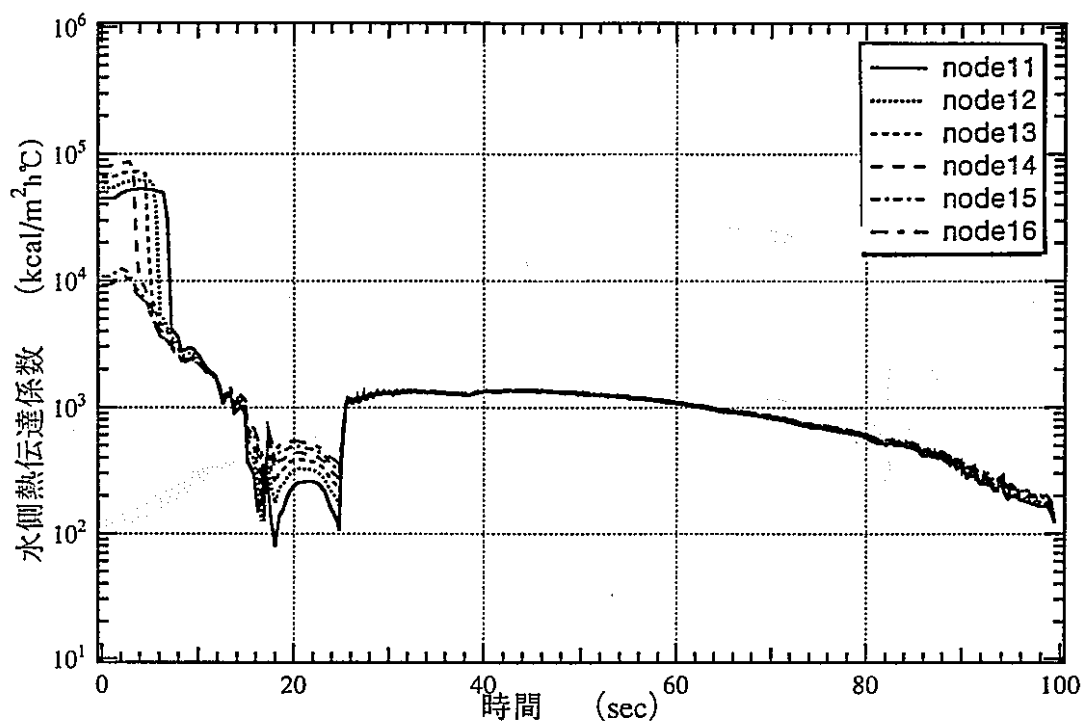


ケース1 (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

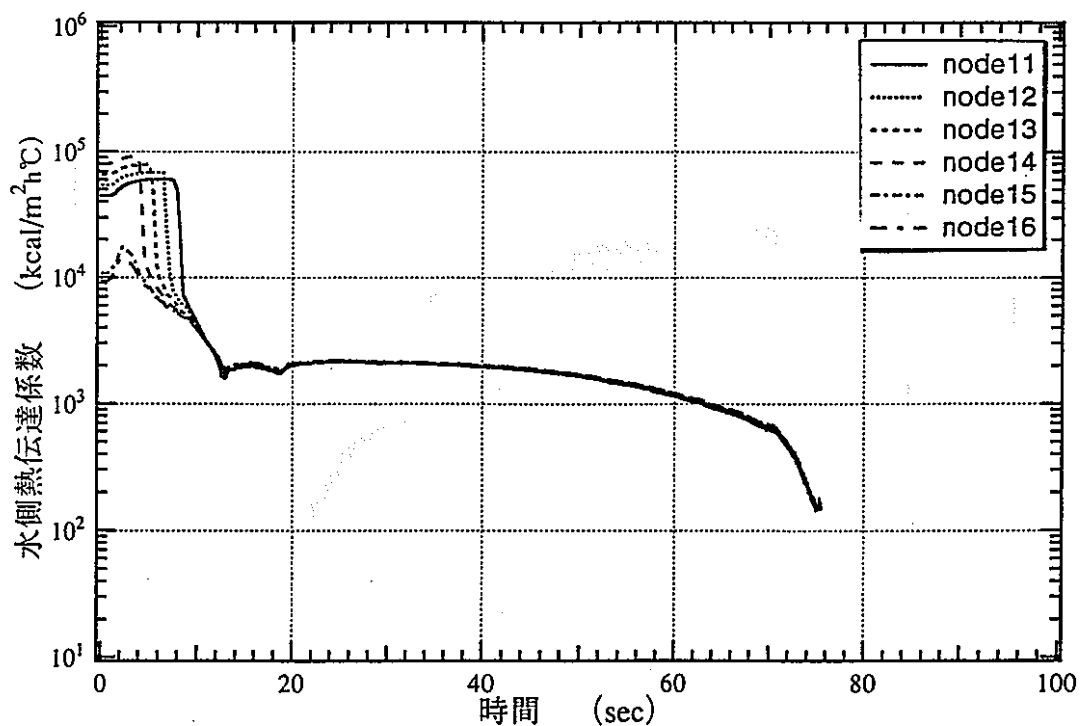


ケース3 (EV入口弁3B、EV出口弁 8B)

図2.4(3)-9 EV コイル下部熱伝達係数変化 (定格運転状態からのブロー)

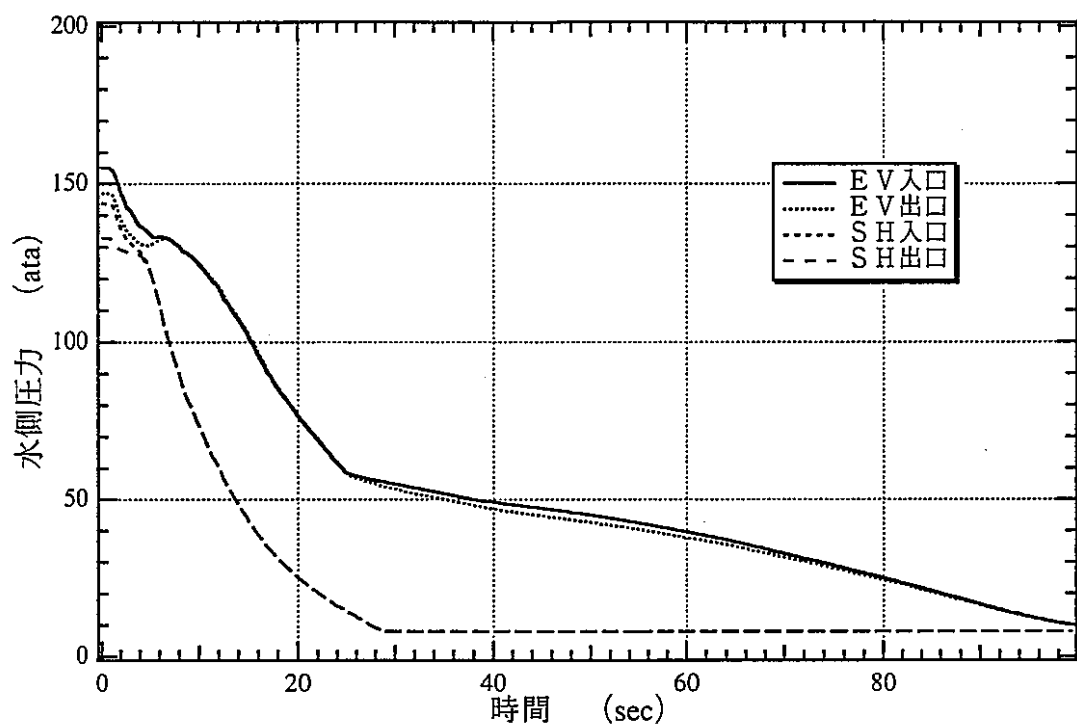


ケース1 (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

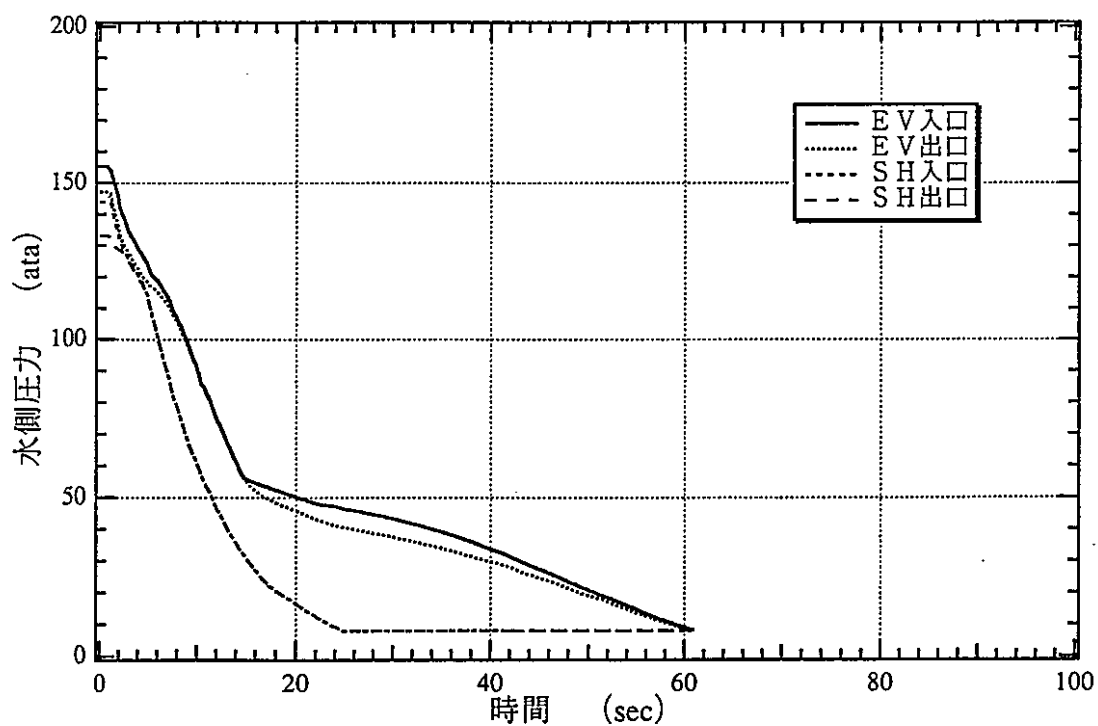


ケース3 (EV入口弁3B、EV出口弁 8B)

図2.4(3)-10 EV コイル下部熱伝達係数変化 (定格運転状態からのブロー)



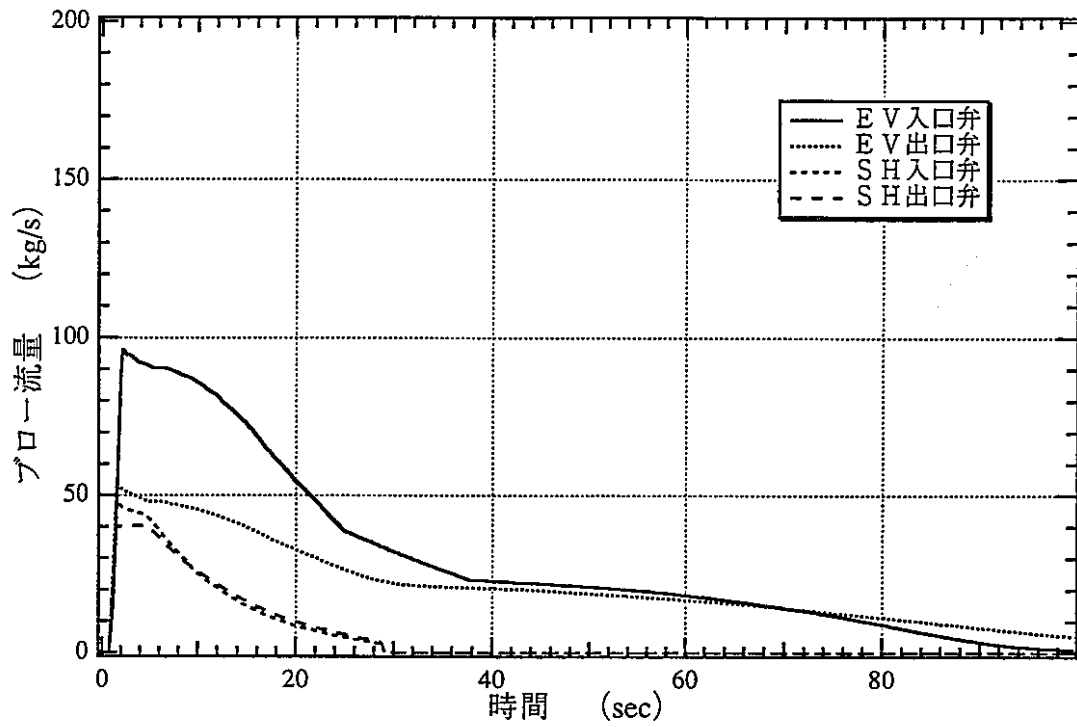
ケース1 (EV入口弁3B、EV出口弁4B)



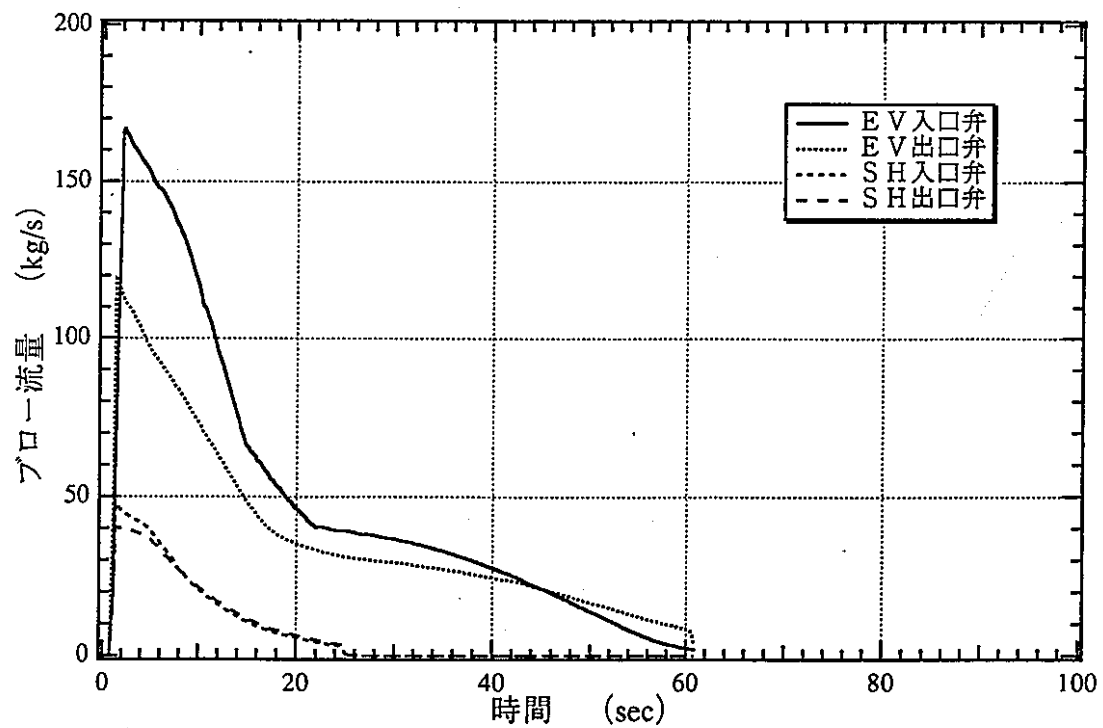
ケース4 (EV入口弁4B、EV出口弁6B)

図2.4(4)-1 SG 出入口圧力変化 (定格運転状態からのブロー)



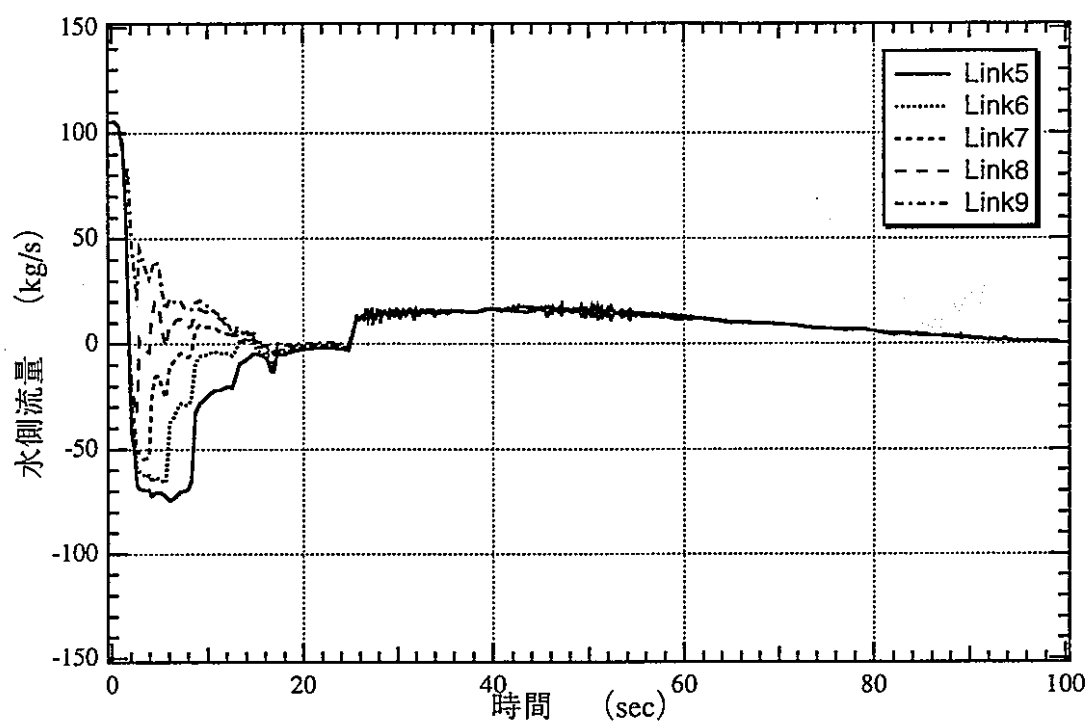


ケース1 (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

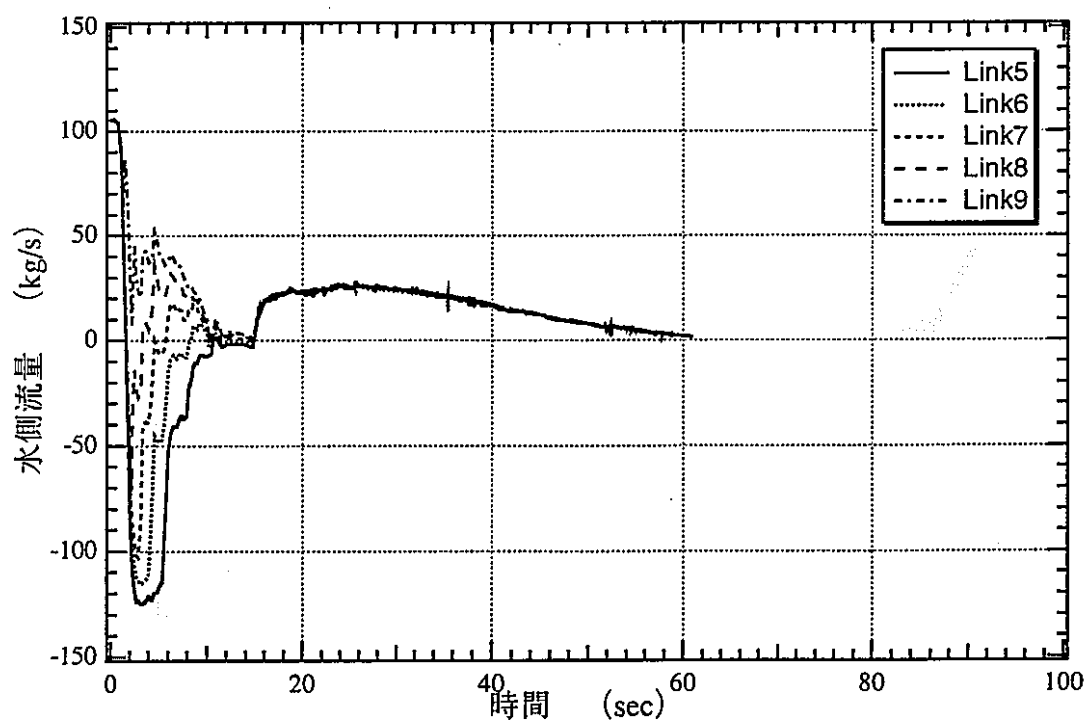


ケース4 (EV入口弁4B、EV出口弁 6B)

図2.4(4)-2 SG 出入口放出弁流量 (定格運転状態からのブロー)

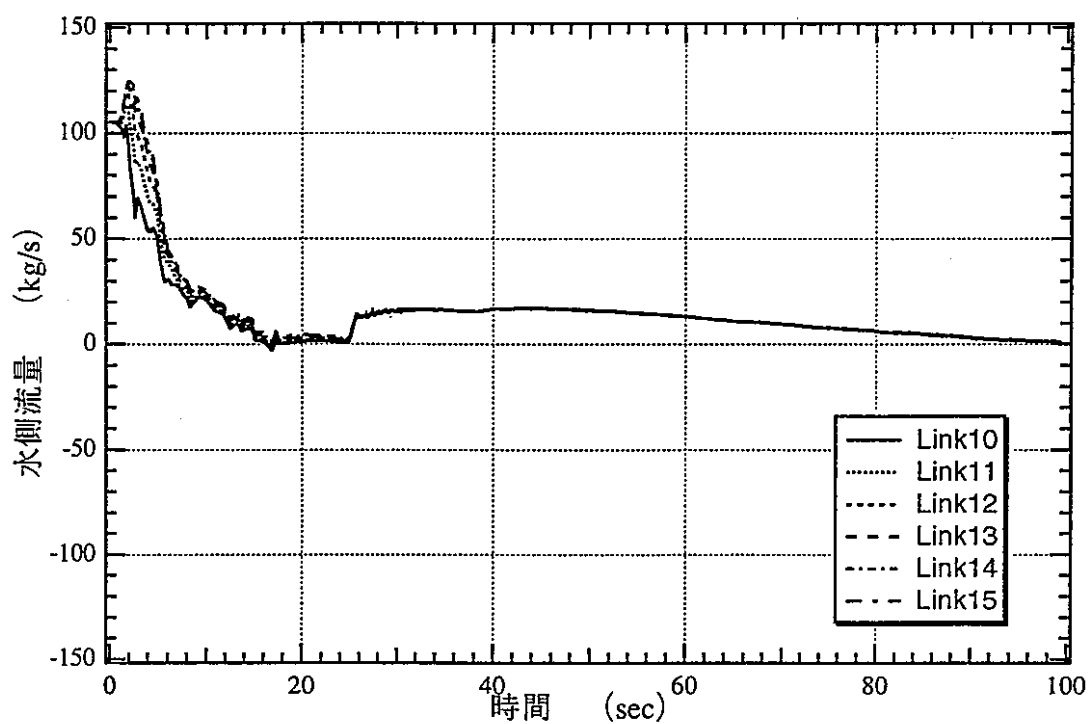


ケース1 (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

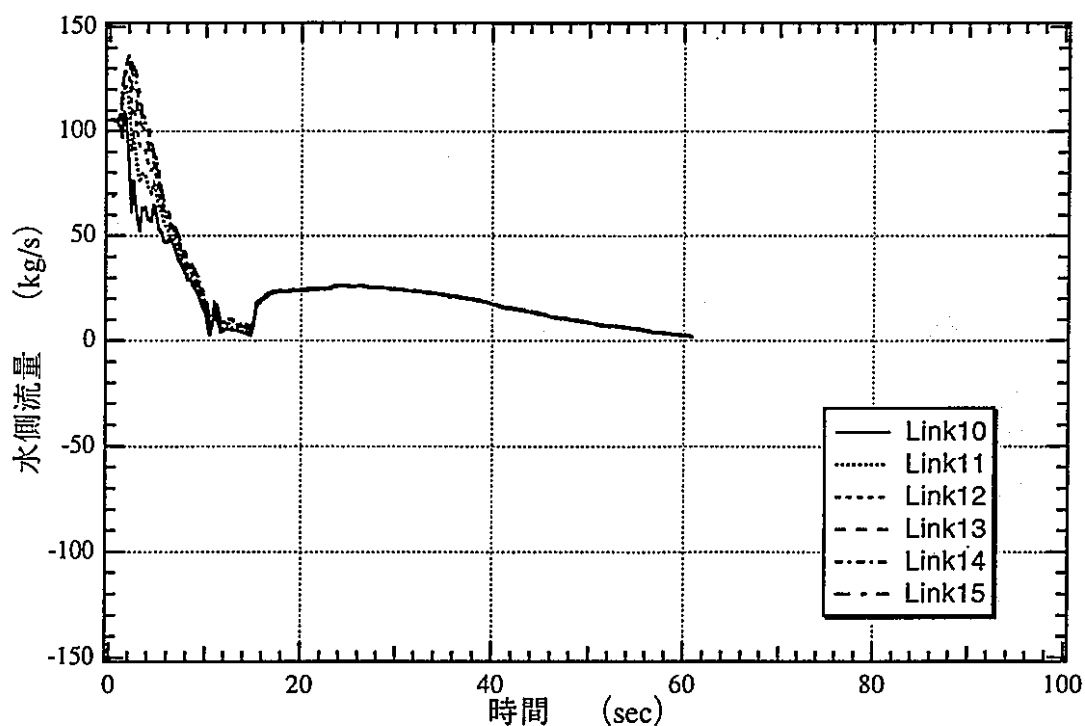


ケース4 (EV入口弁4B、EV出口弁 6B)

図2.4(4)-3 EV コイル下部流量変化 (定格運転状態からのブロー)

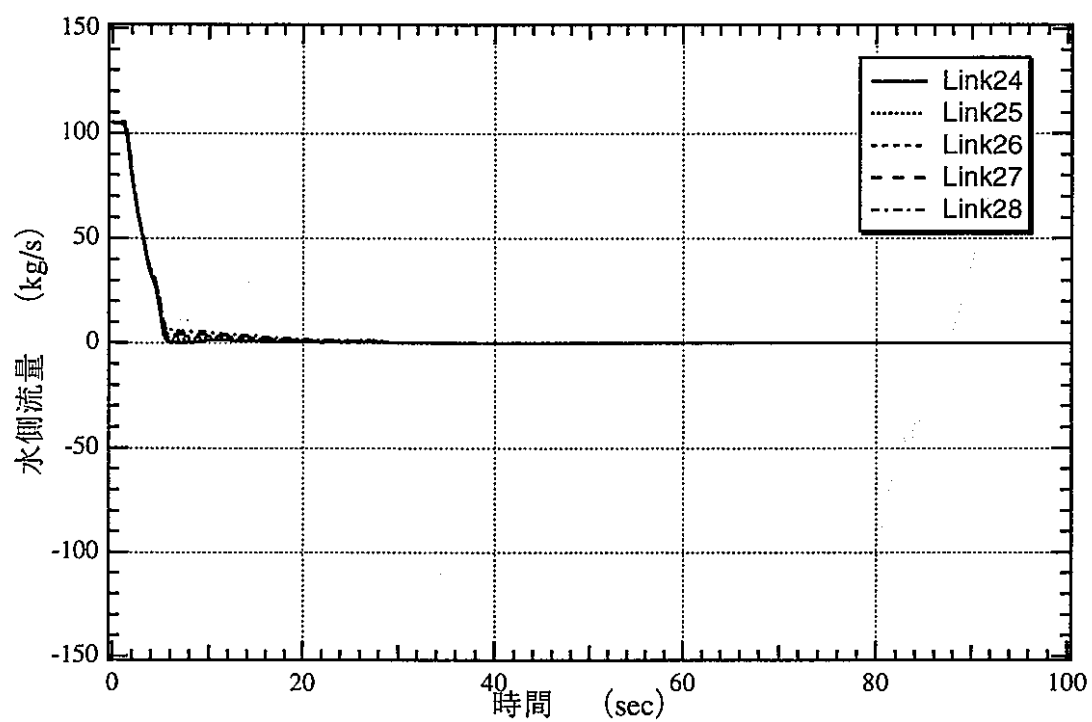


ケース1 (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

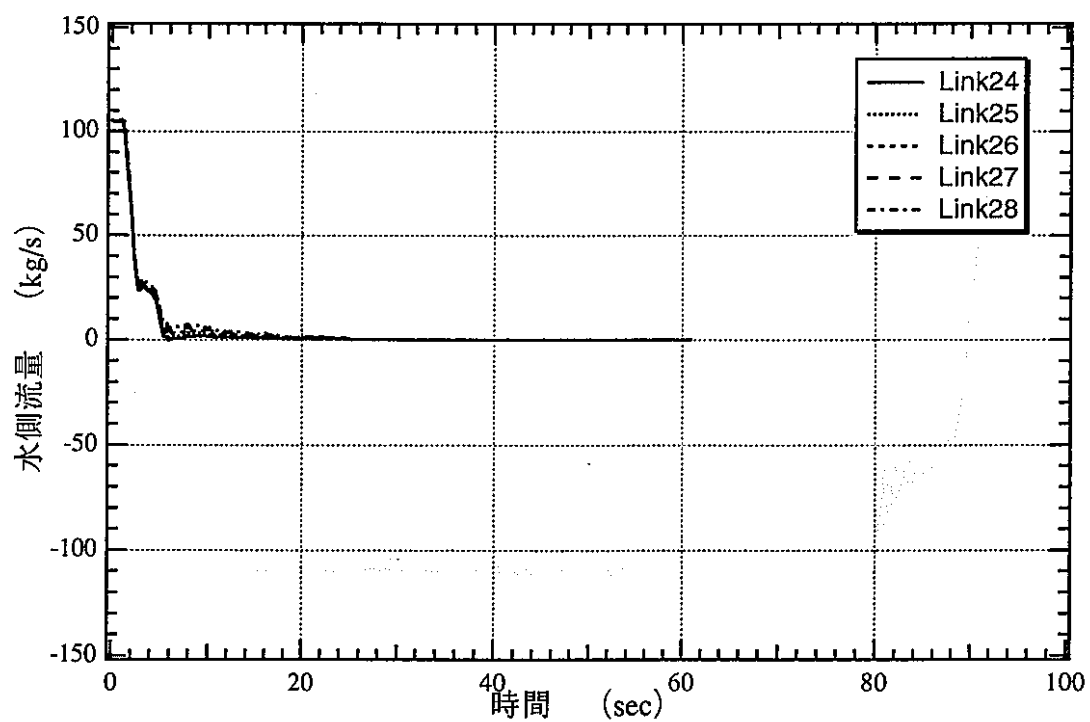


ケース4 (EV入口弁4B、EV出口弁 6B)

図2.4(4)-4 EV 管束部上部流量変化 (定格運転状態からのブロー)

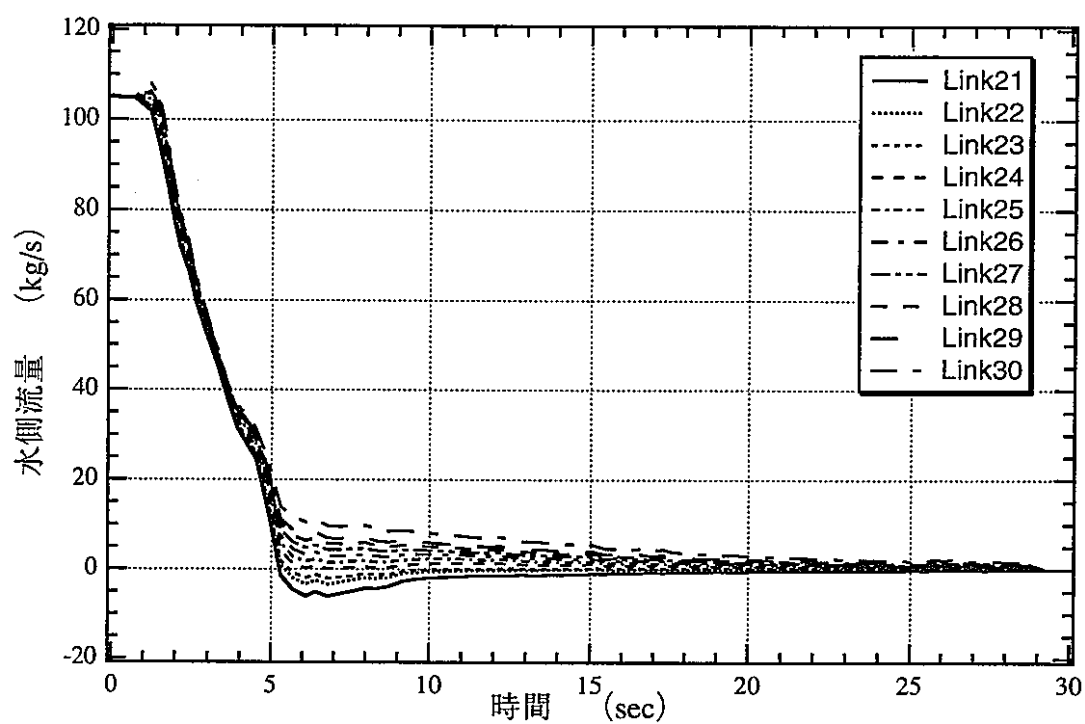


ケース 1 (BLOPH)

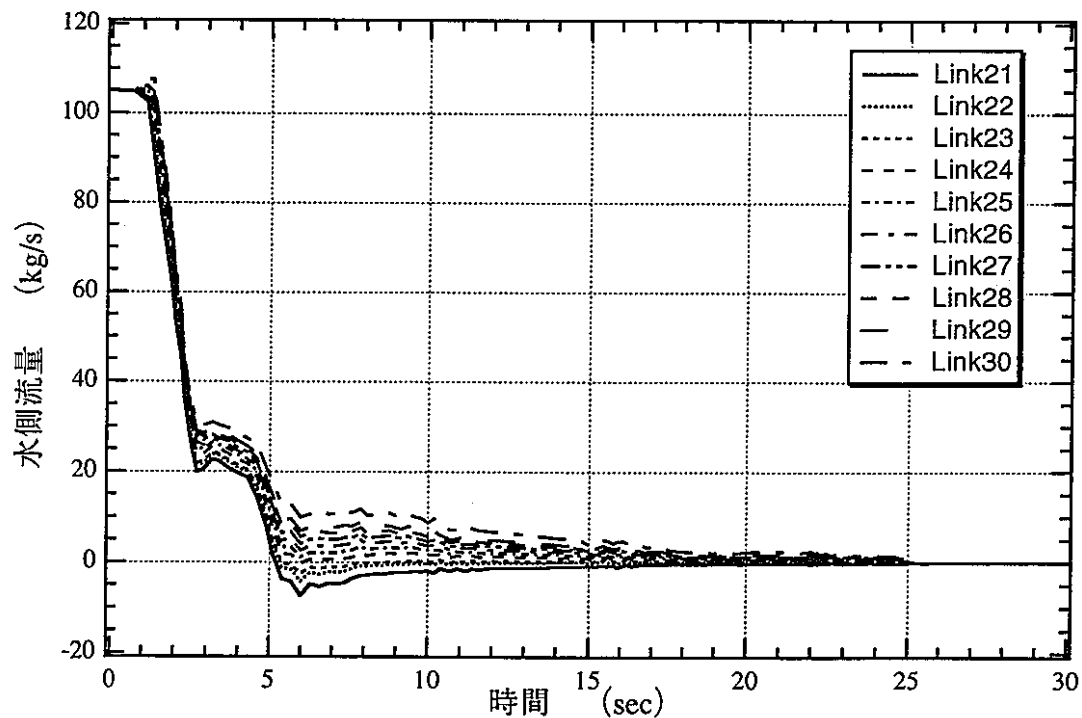


ケース4 (BLOPH)

図2.4(4)-5 SH コイル流量変化 (定格運転状態からのブロー)

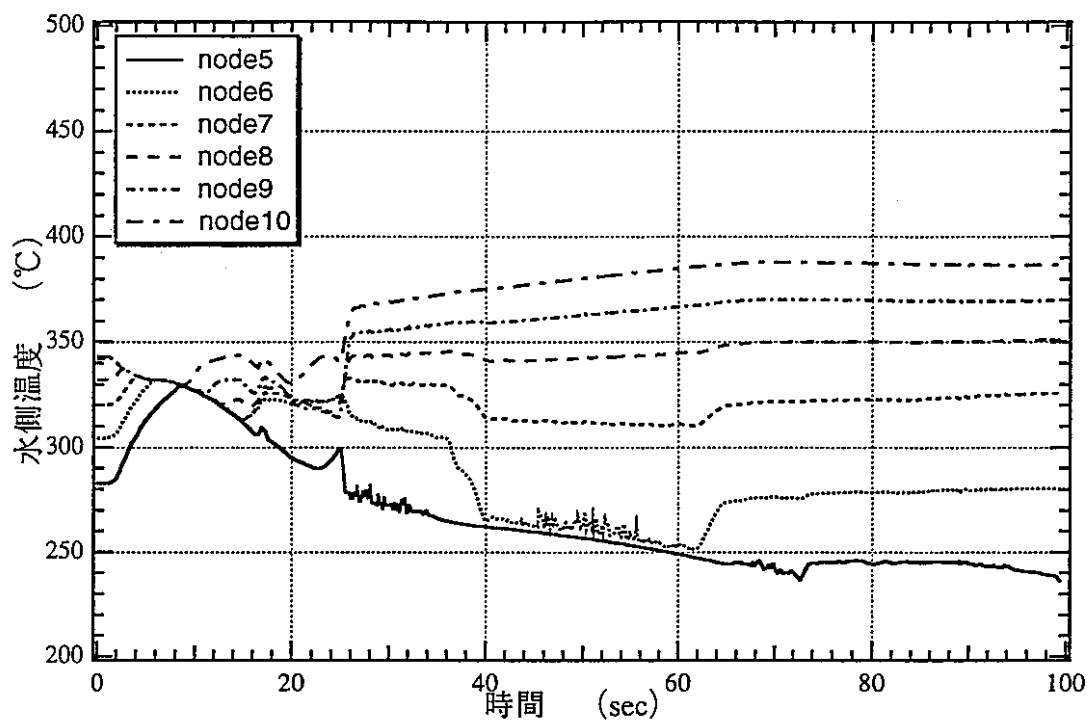


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

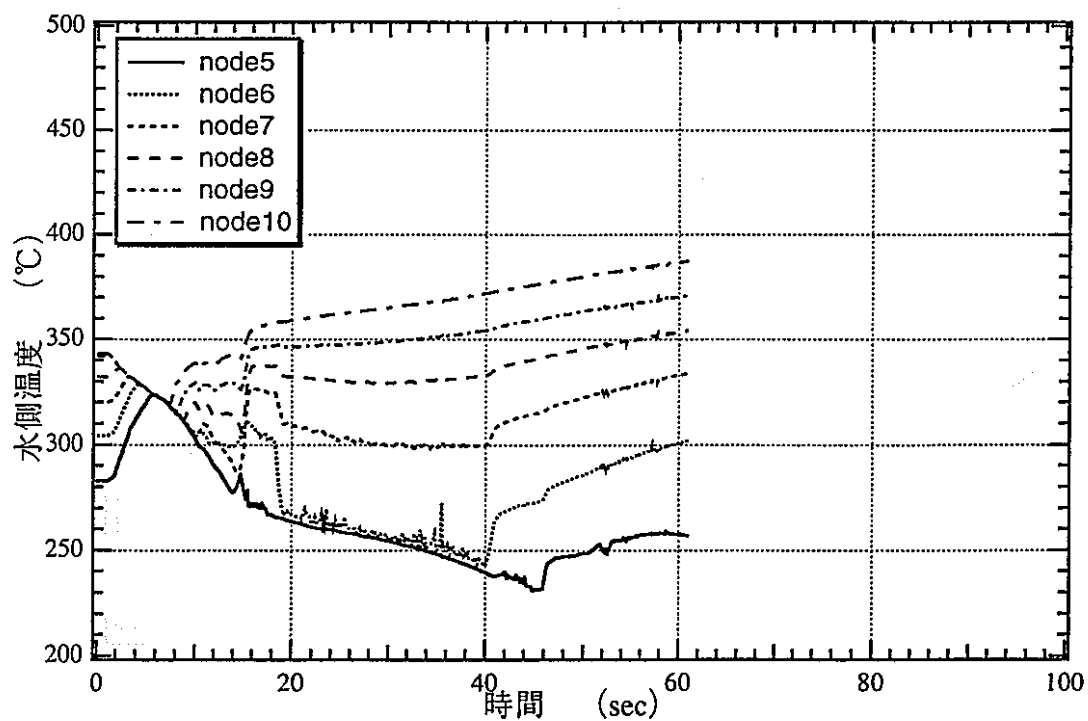


ケース4 (EV入口弁4B、EV出口弁6B)

図2.4(4)-6 SH コイル部流量変化 (定格運転状態からのブロー)

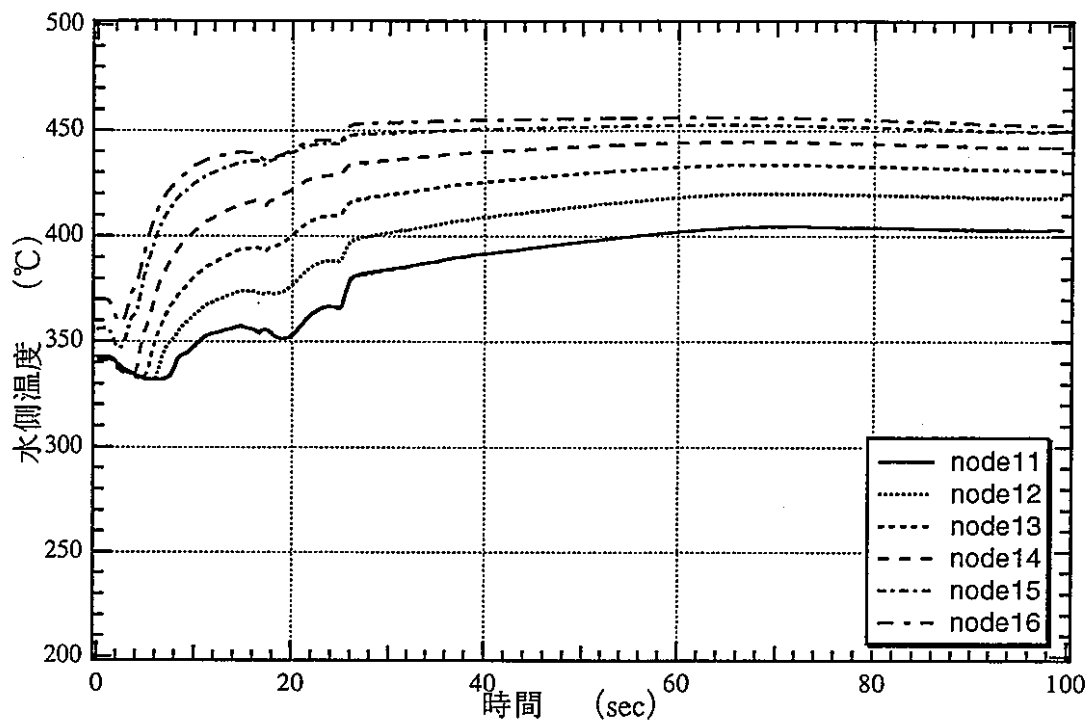


ケース1 (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

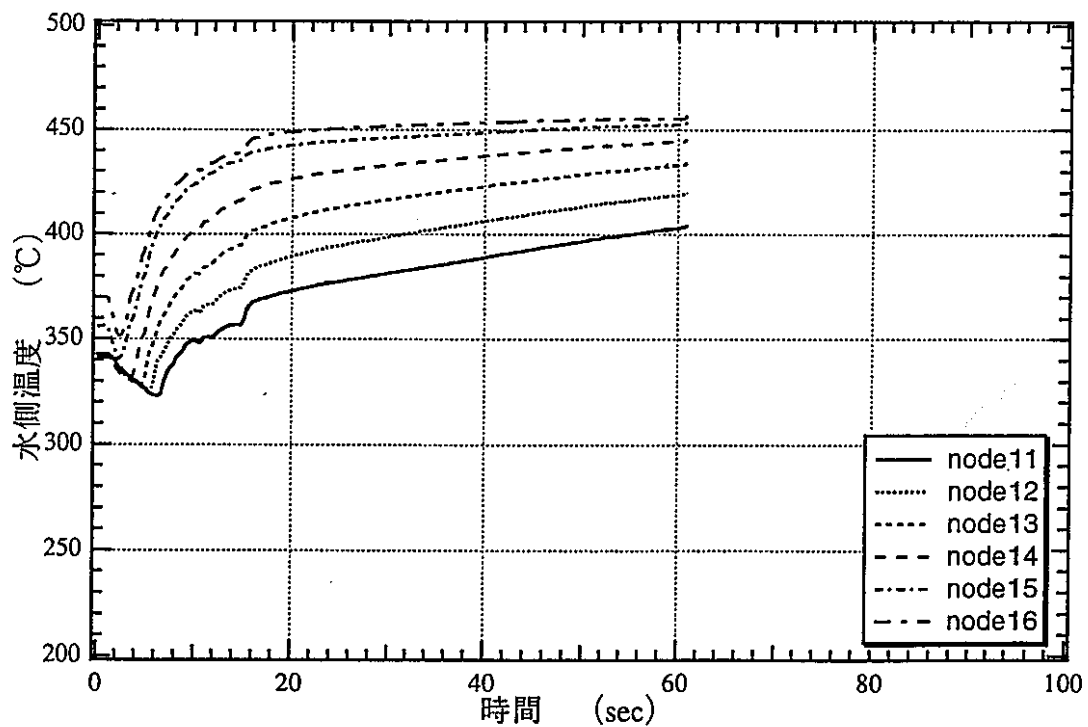


ケース4 (EV入口弁4B、EV出口弁 6B)

図2.4(4)-7 EV コイル下部温度変化 (定格運転状態からのブロー)

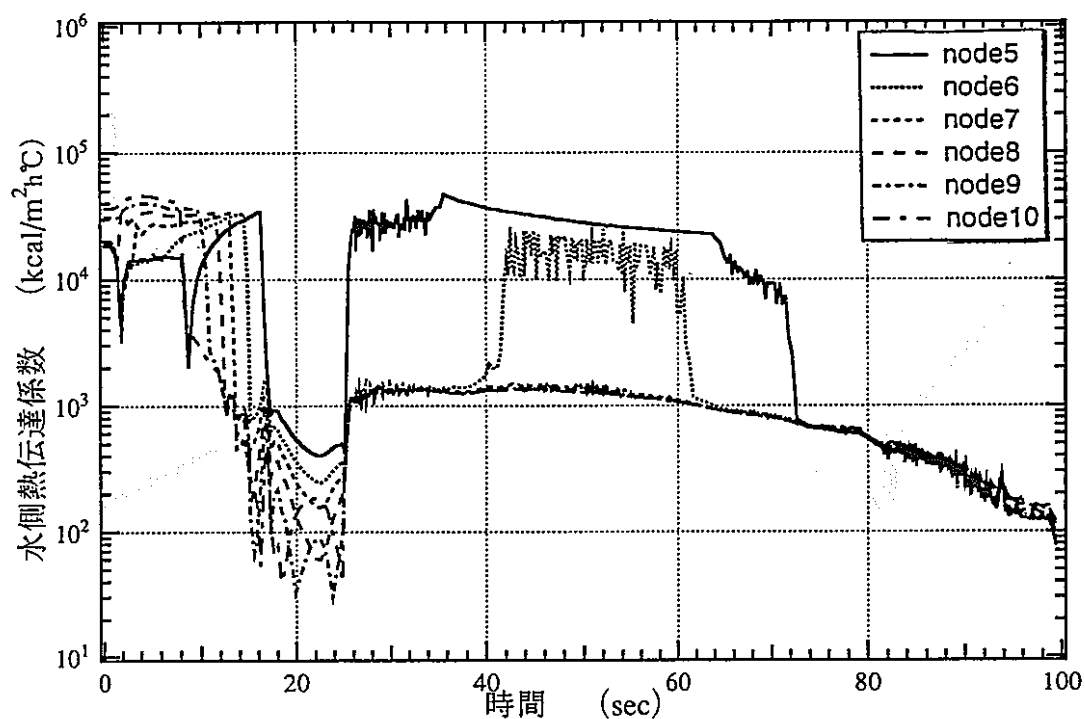


ケース1 (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

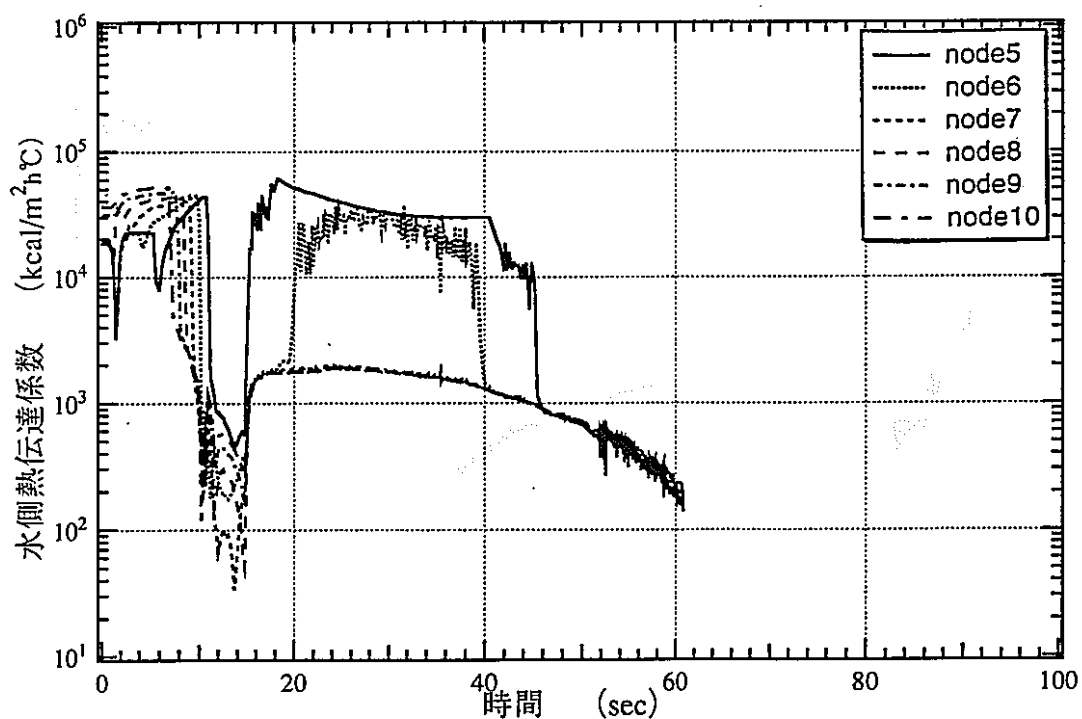


ケース4 (EV入口弁4B、EV出口弁 6B)

図2.4(4)-8 EV コイル上部温度変化 (定格運転状態からのブロー)



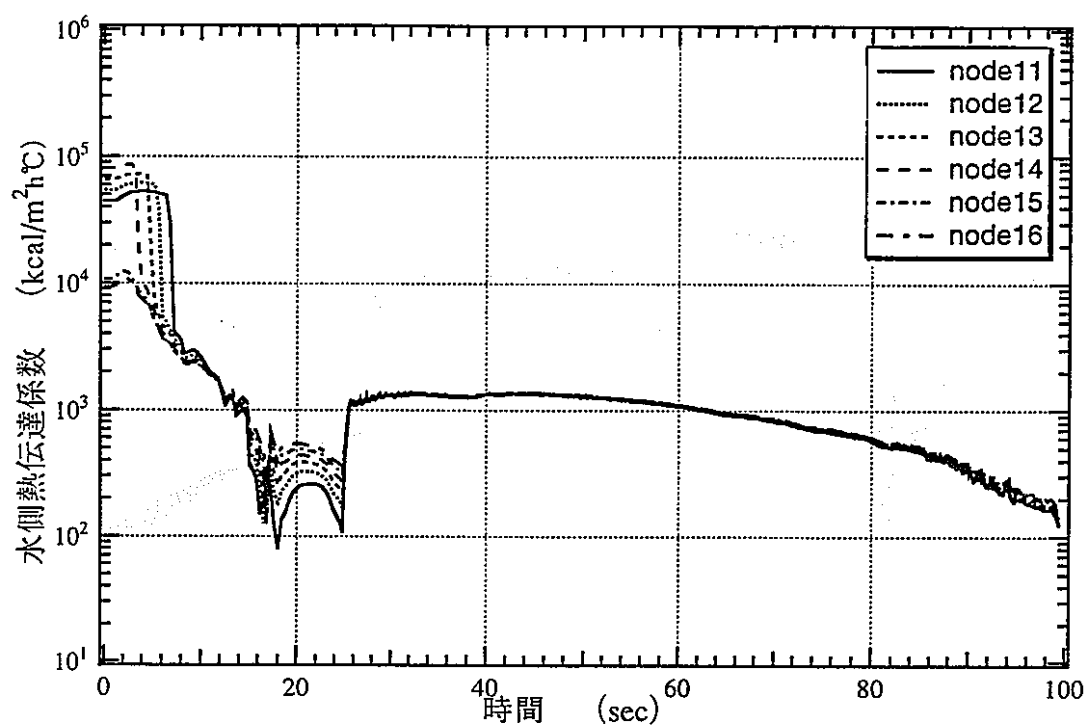
ケース1 (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)



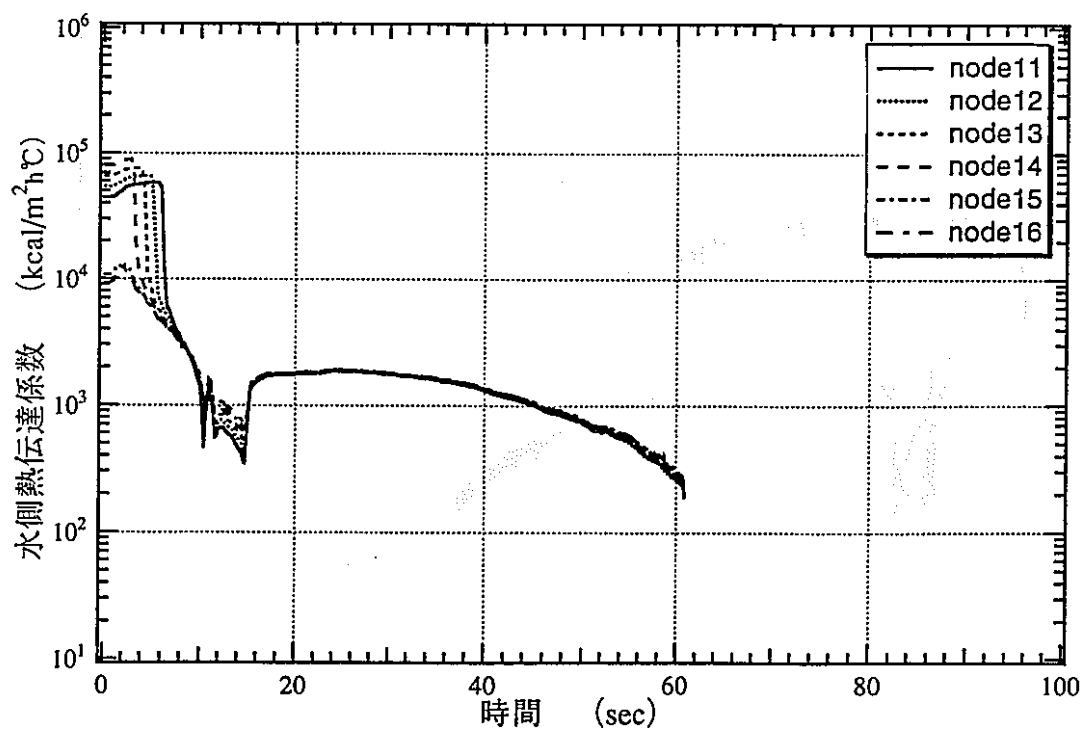
ケース4 (EV入口弁4B、EV出口弁 6B)

図2.4(4)-9 EV コイル下部熱伝達係数変化 (定格運転状態からのブロー)



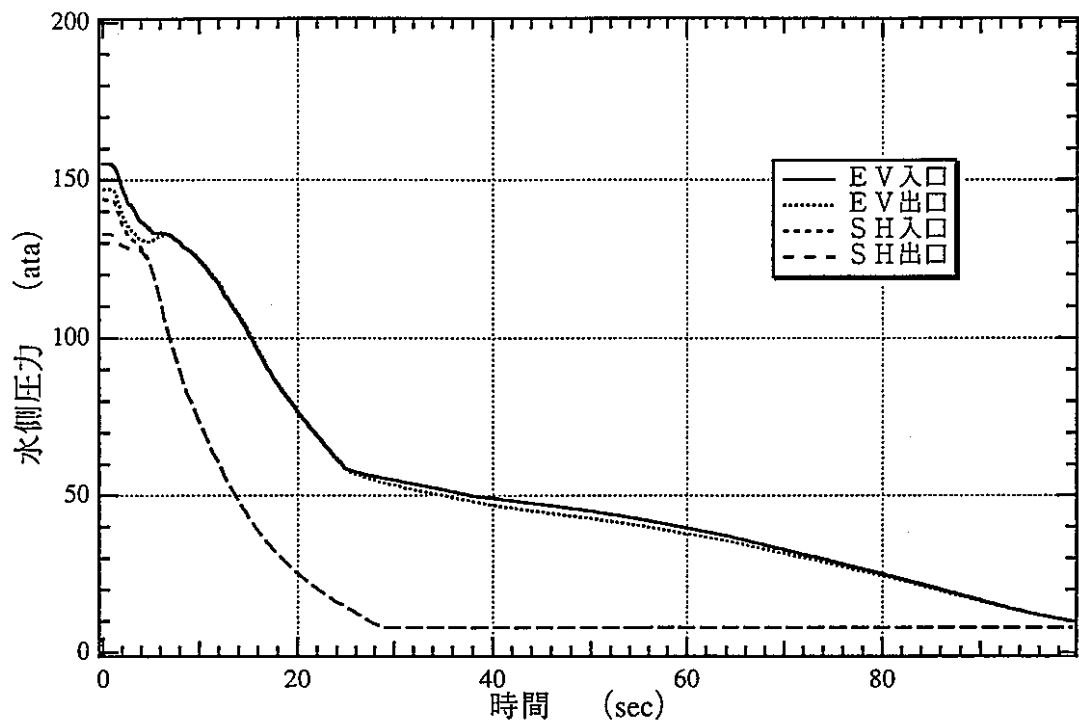


ケース1 (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

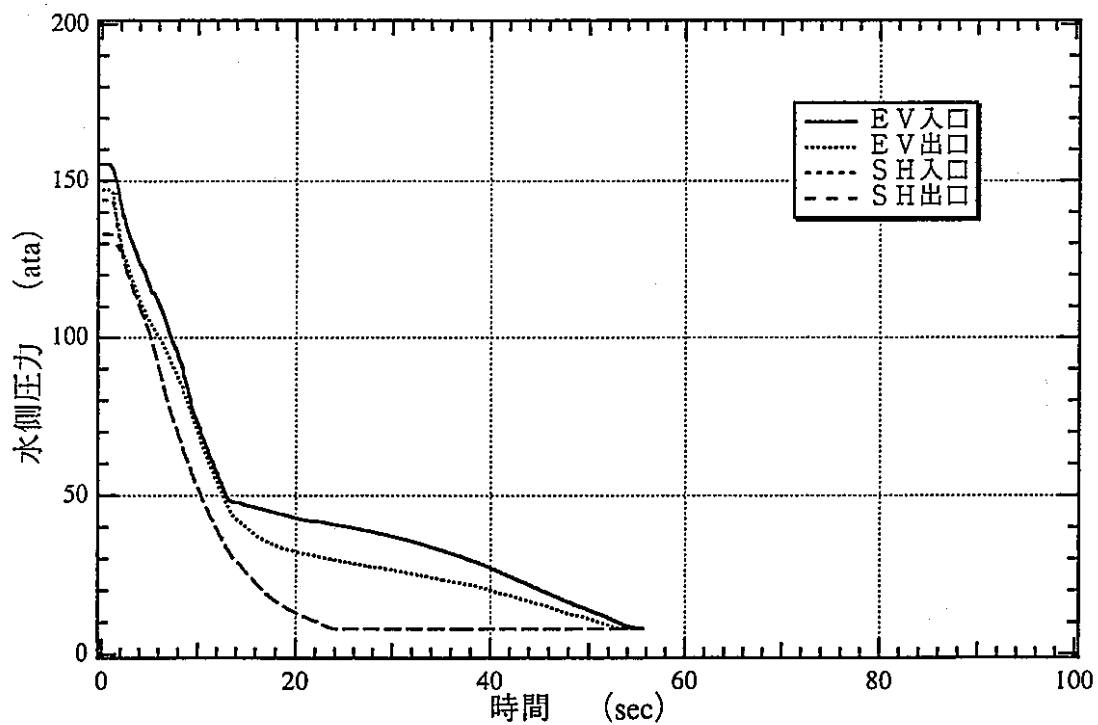


ケース4 (EV入口弁4B、EV出口弁 6B)

図2.4(4)-10 EV コイル下部熱伝達係数変化 (定格運転状態からのブロー)

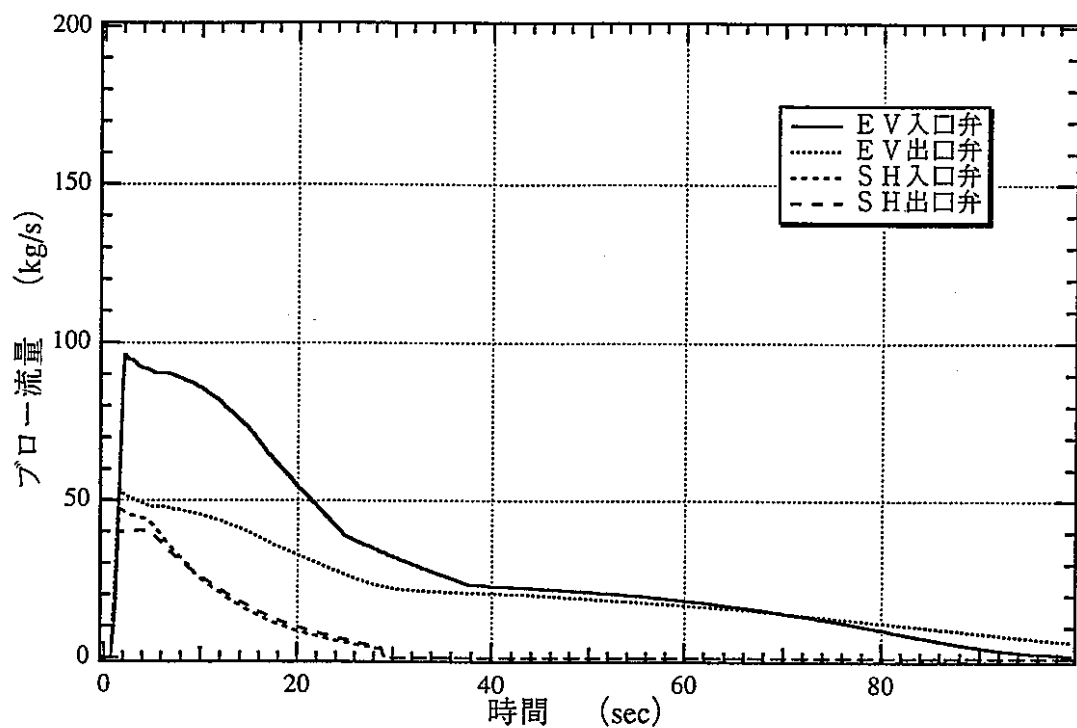


ケース1 (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

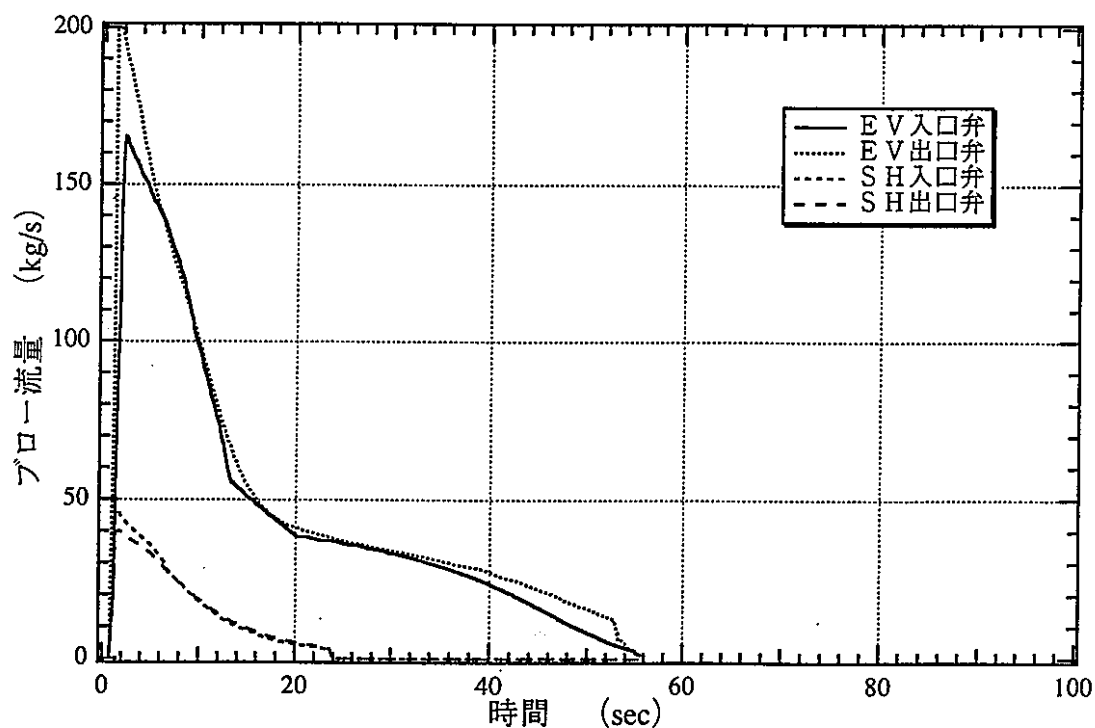


ケース5 (EV入口弁4B、EV出口弁8B)

図2.4(5)-1 SG 出入口圧力変化 (定格運転状態からのブロー)

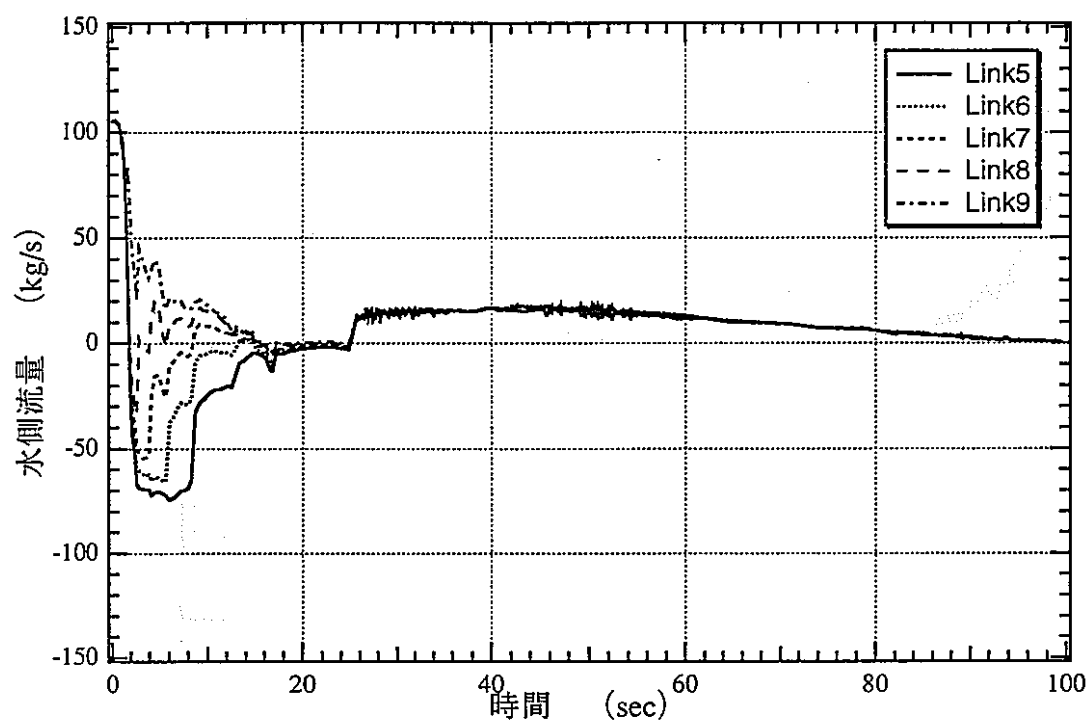


ケース1 (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

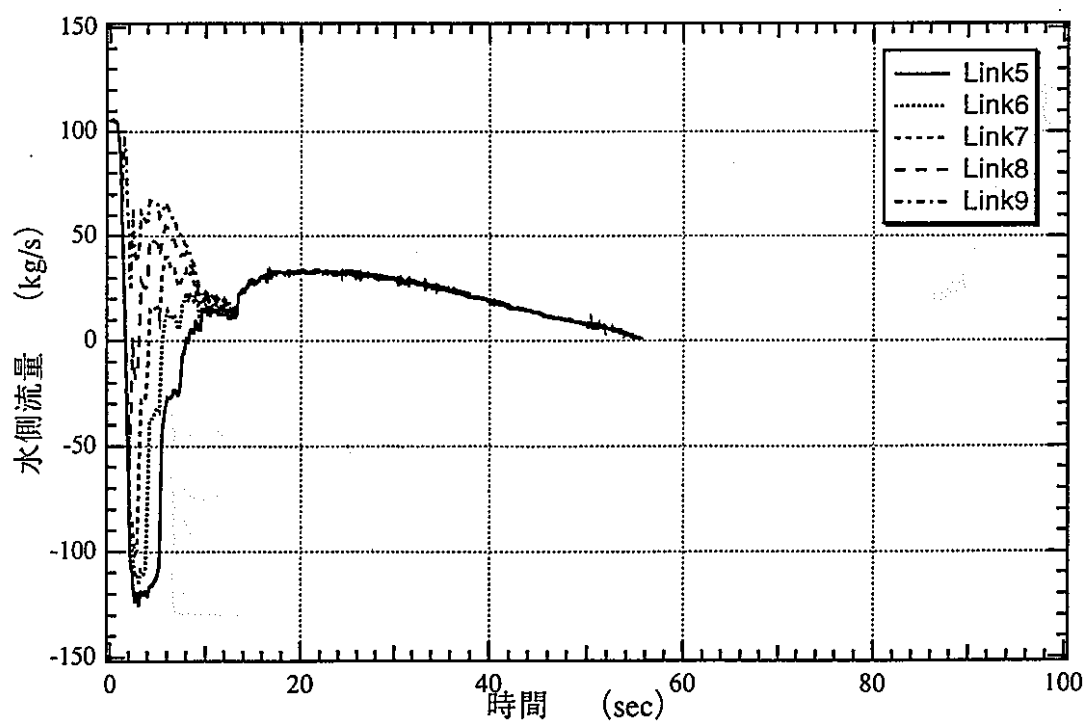


ケース5 (EV入口弁4B、EV出口弁 8B)

図2.4(5)-2 SG 出入口放出弁流量 (定格運転状態からのブロー)

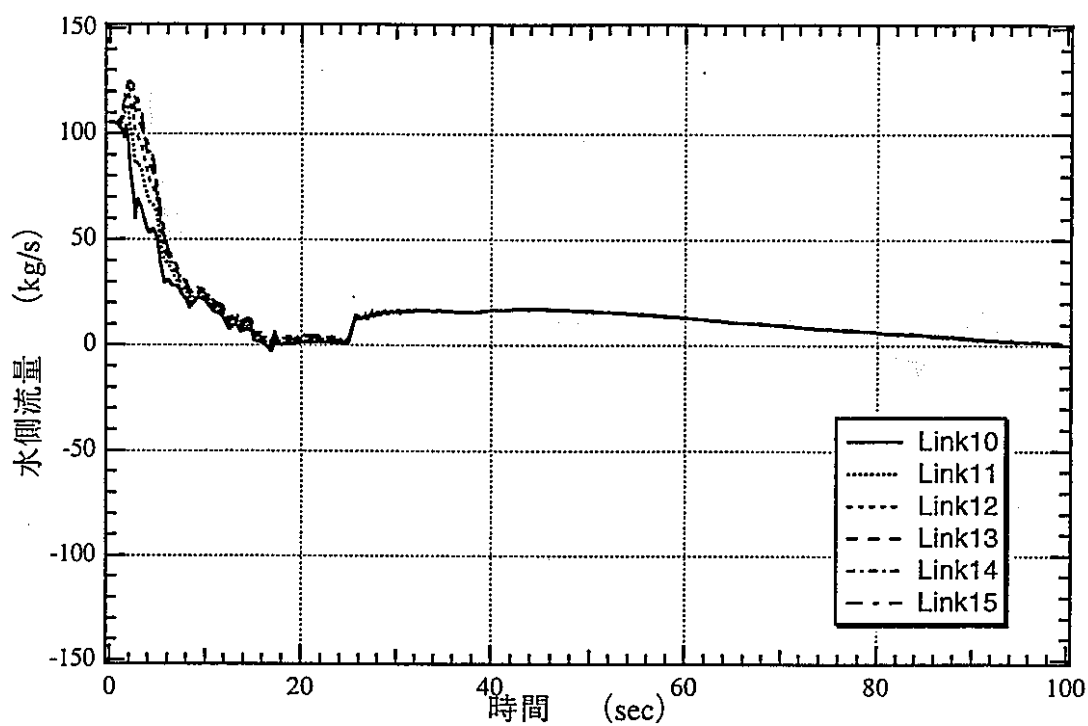


ケース1 (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

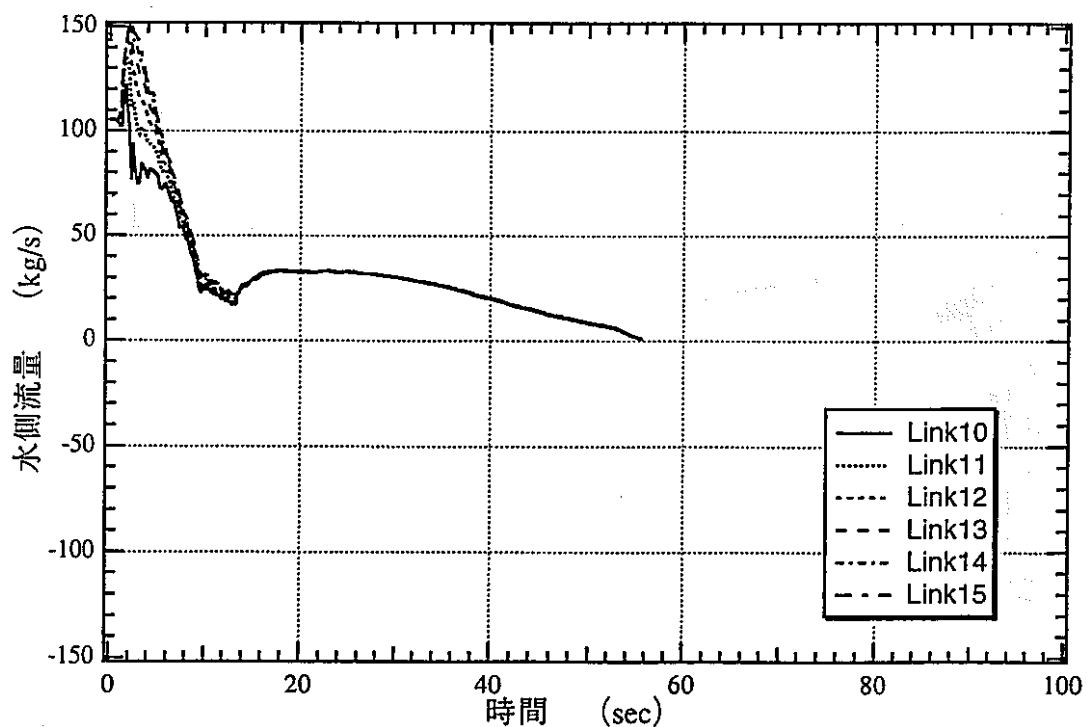


ケース5 (EV入口弁4B、EV出口弁 8B)

図2.4(5)-3 EV コイル下部流量変化 (定格運転状態からのブロー)

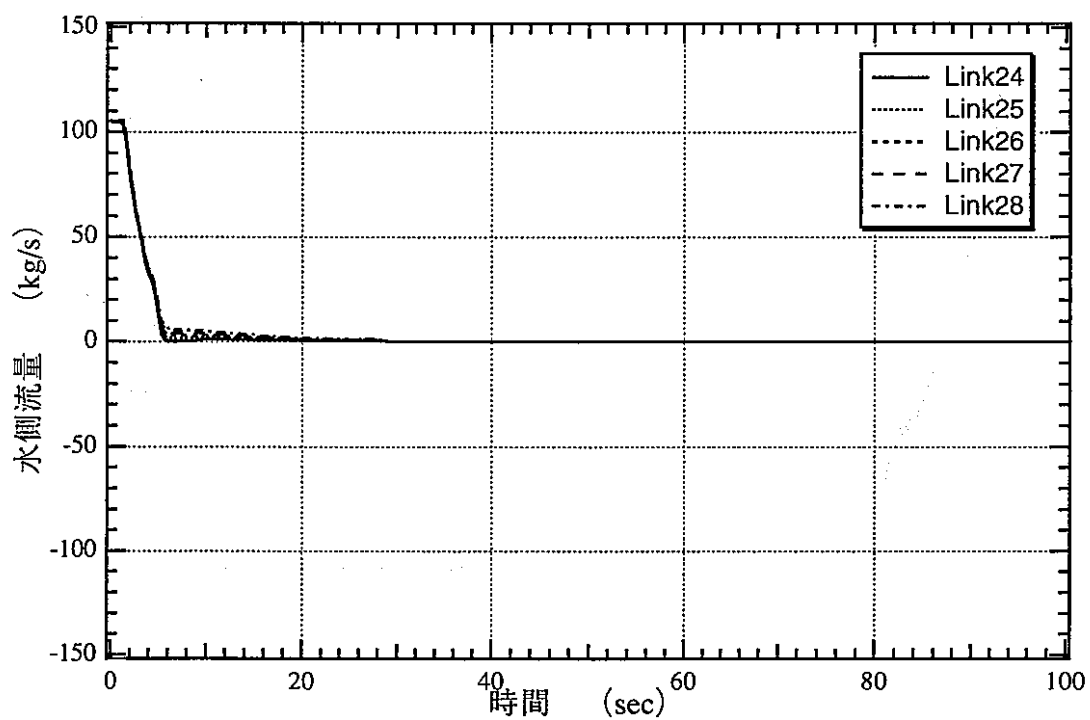


ケース1 (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

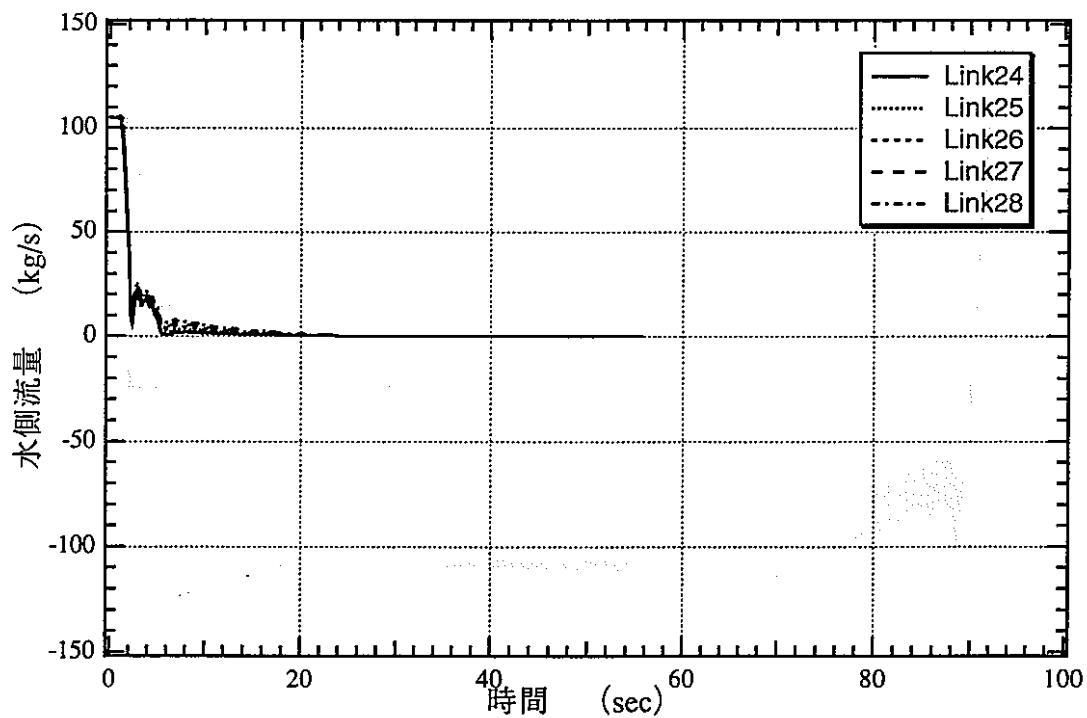


ケース5 (EV入口弁4B、EV出口弁 8B)

図2.4(5)-4 EV 管東部上部流量変化 (定格運転状態からのブロー)

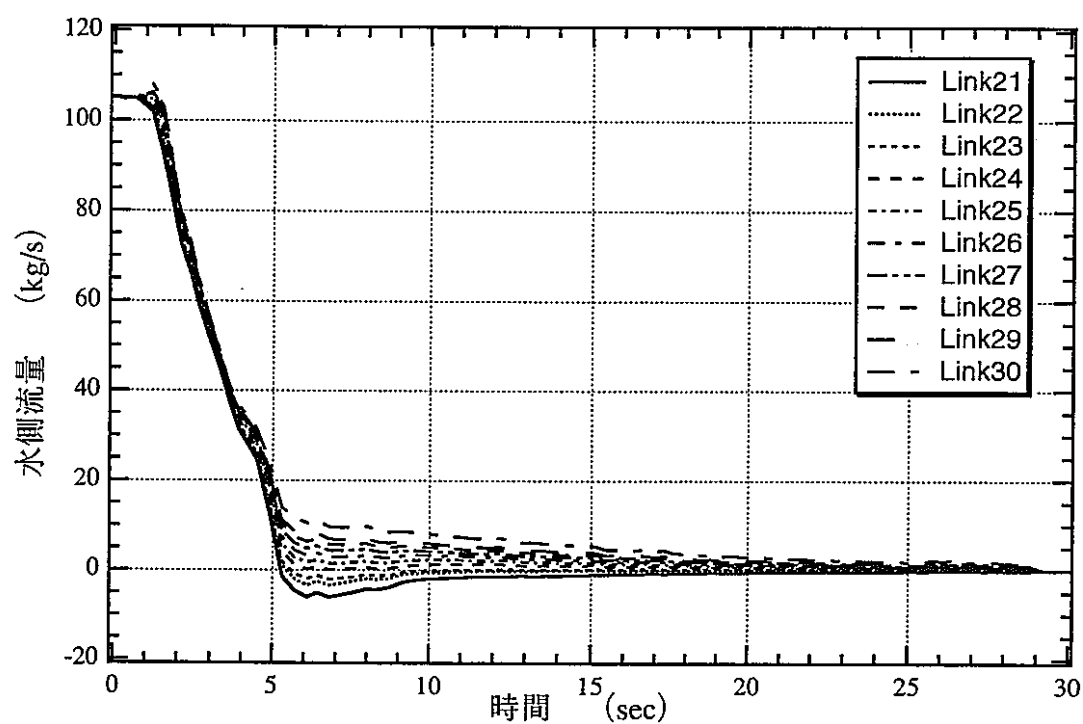


ケース 1 (BLOPH)

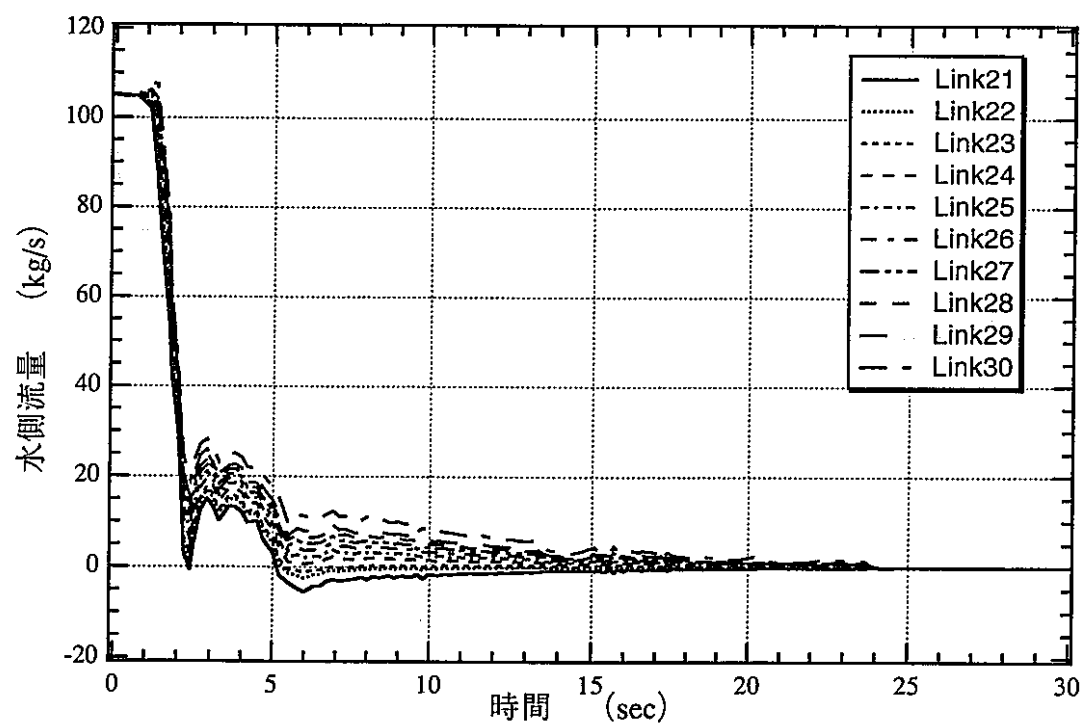


ケース5 (BLOPH)

図2.4(5)-5 SH コイル流量変化 (定格運転状態からのブロー)

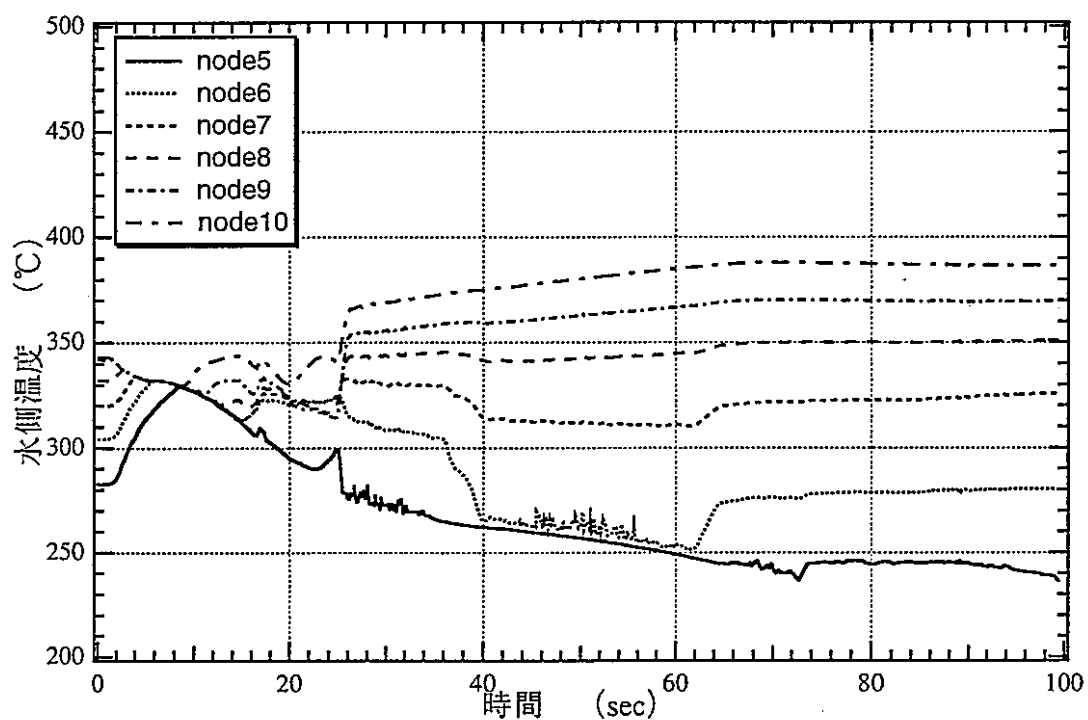


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

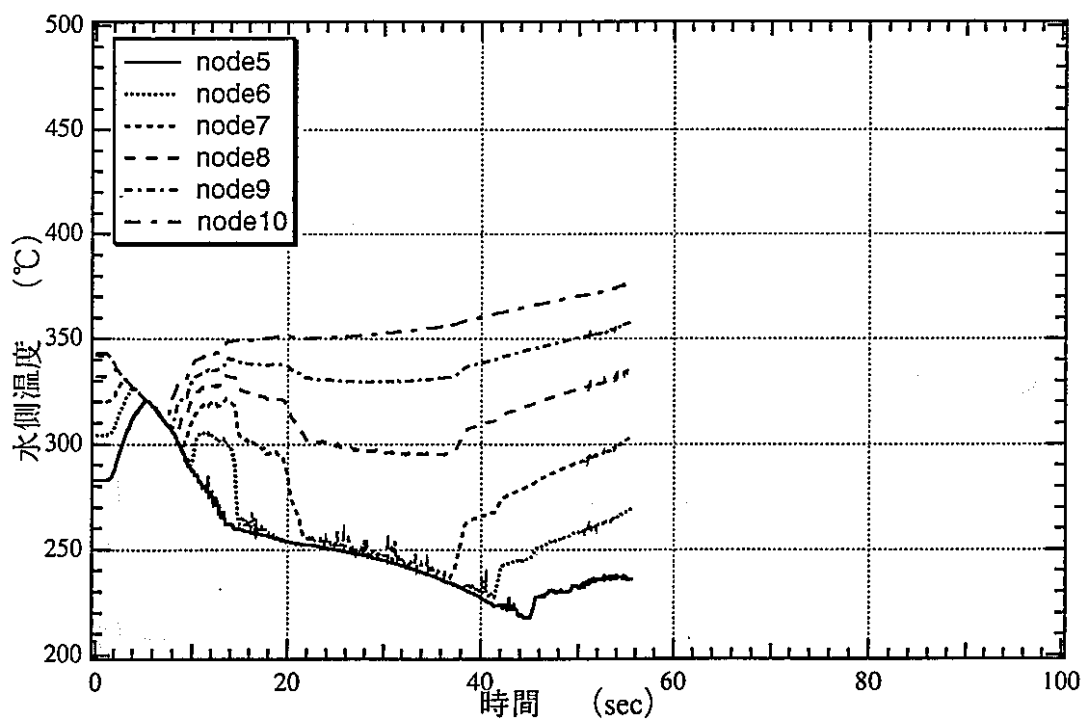


ケース5 (EV入口弁4B、EV出口弁8B)

図2.4(5)-6 SH コイル部流量変化 (定格運転状態からのブロー)



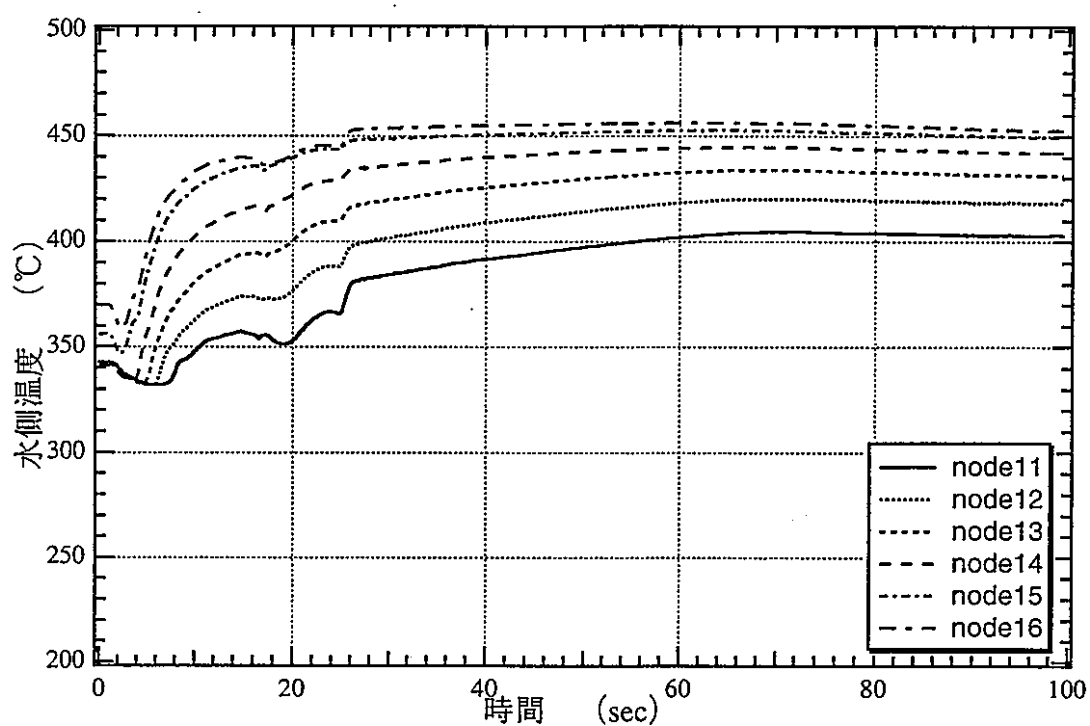
ケース1 (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)



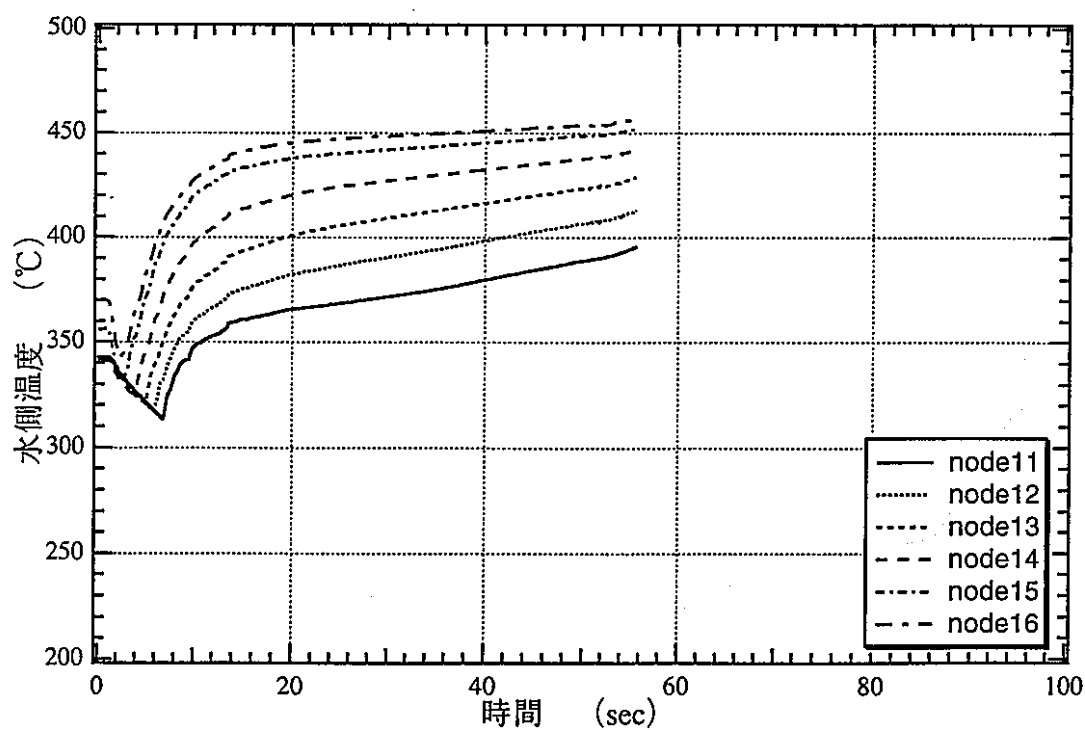
ケース5 (EV入口弁4B、EV出口弁 8B)

図2.4(5)-7 EV コイル下部温度変化 (定格運転状態からのブロー)



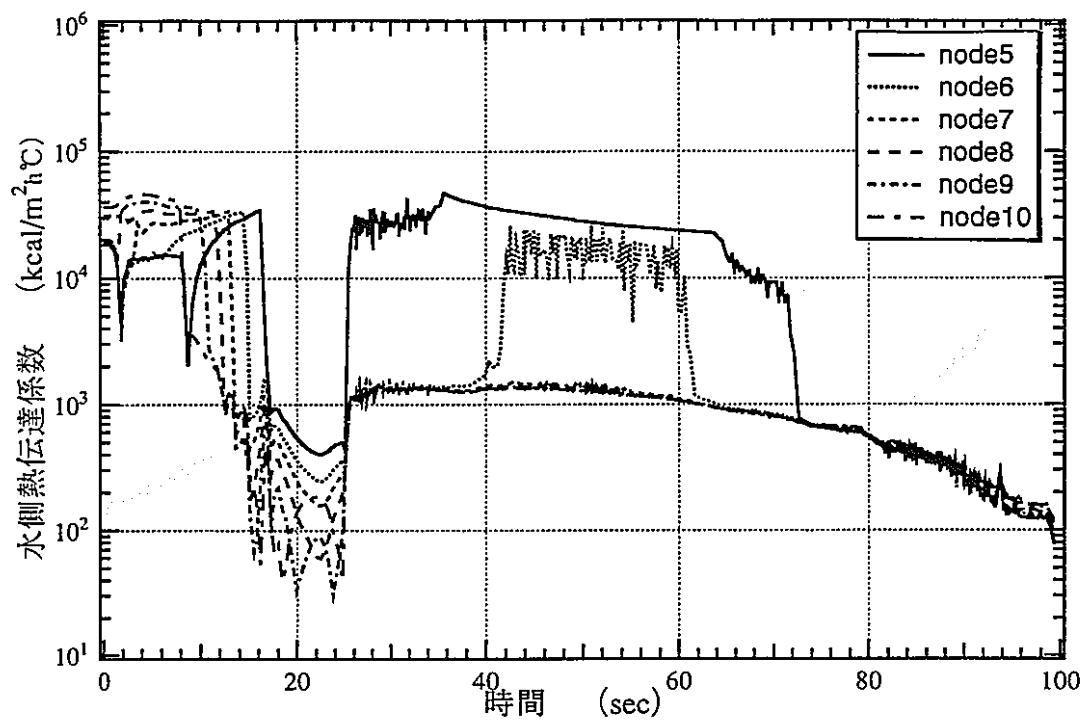


ケース1 (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

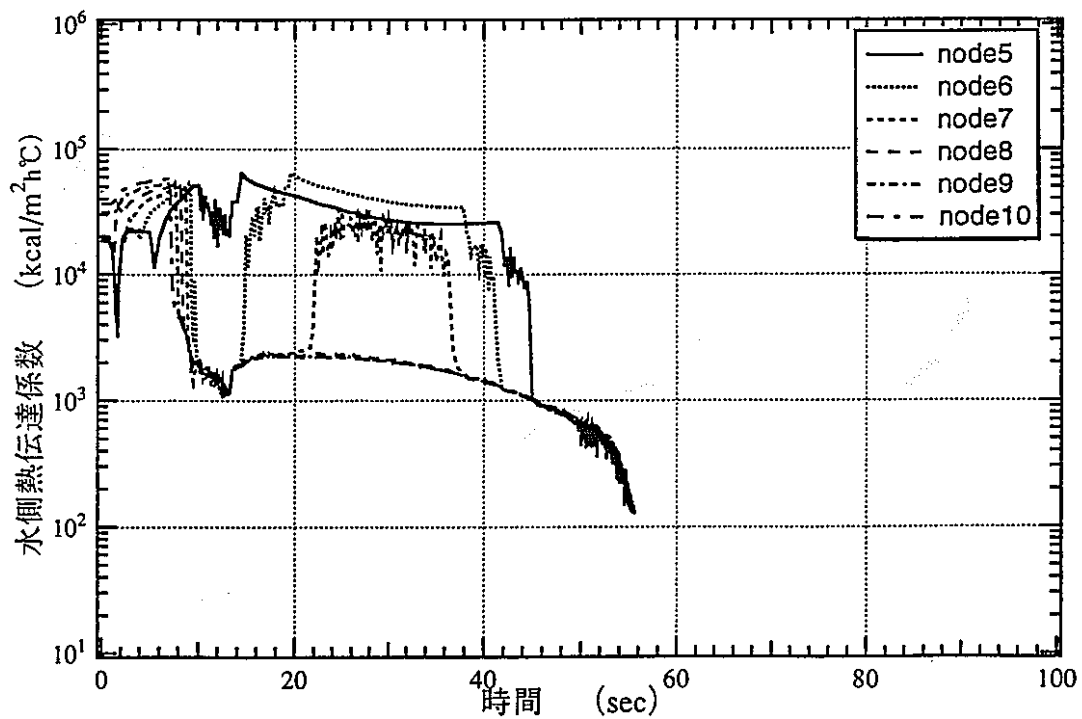


ケース5 (EV入口弁4B、EV出口弁 8B)

図2.4(5)-8 EV コイル上部温度変化 (定格運転状態からのブロー)

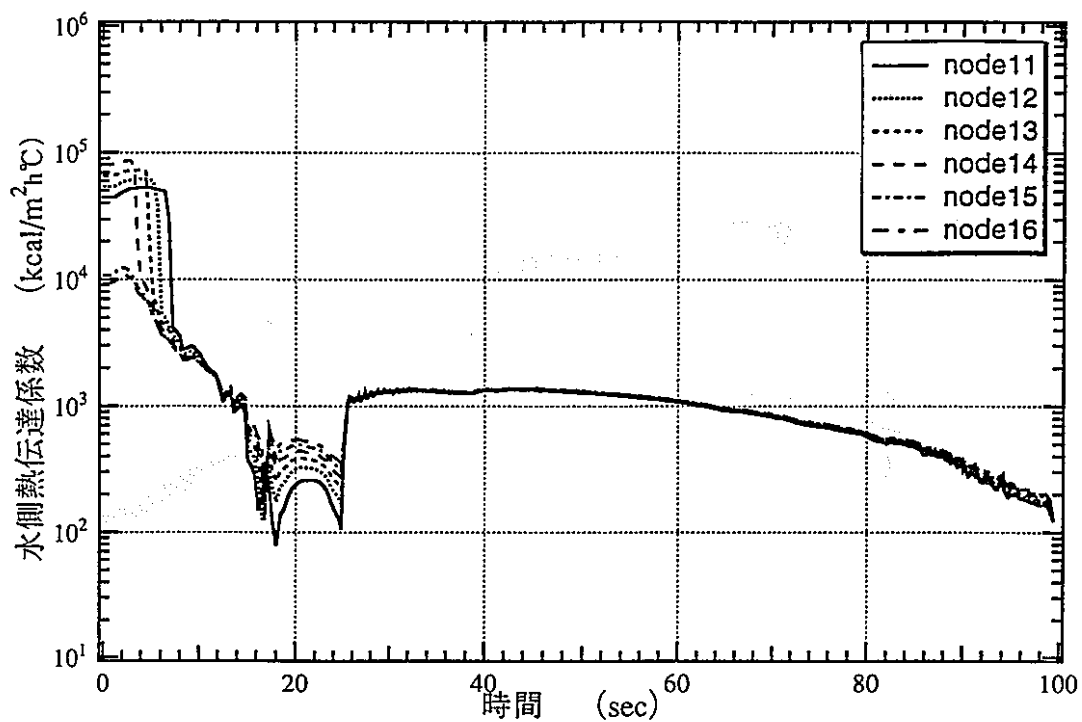


ケース1 (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

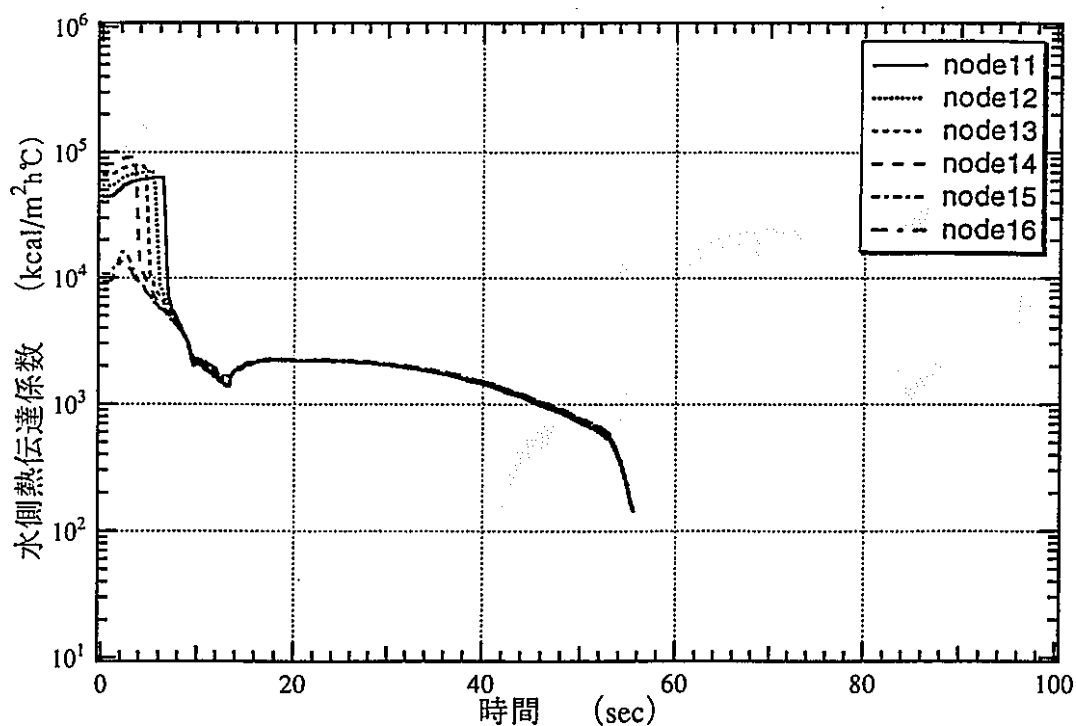


ケース5 (EV入口弁4B、EV出口弁 8B)

図2.4(5)-9 EV コイル下部熱伝達係数変化 (定格運転状態からのブロー)

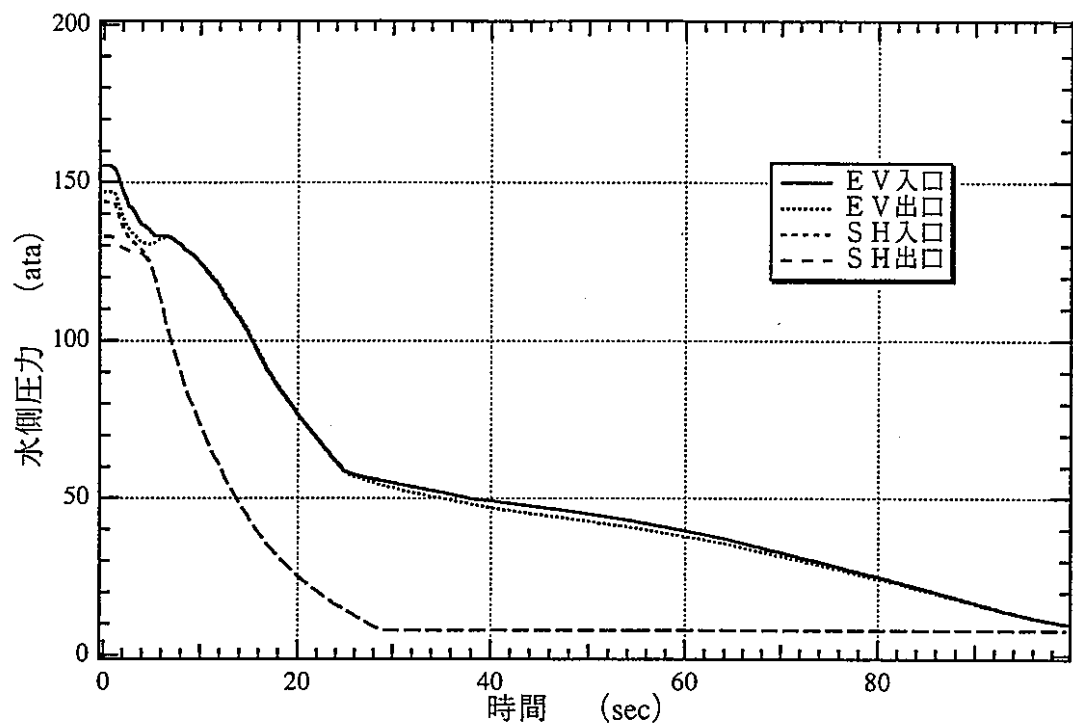


ケース1 (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

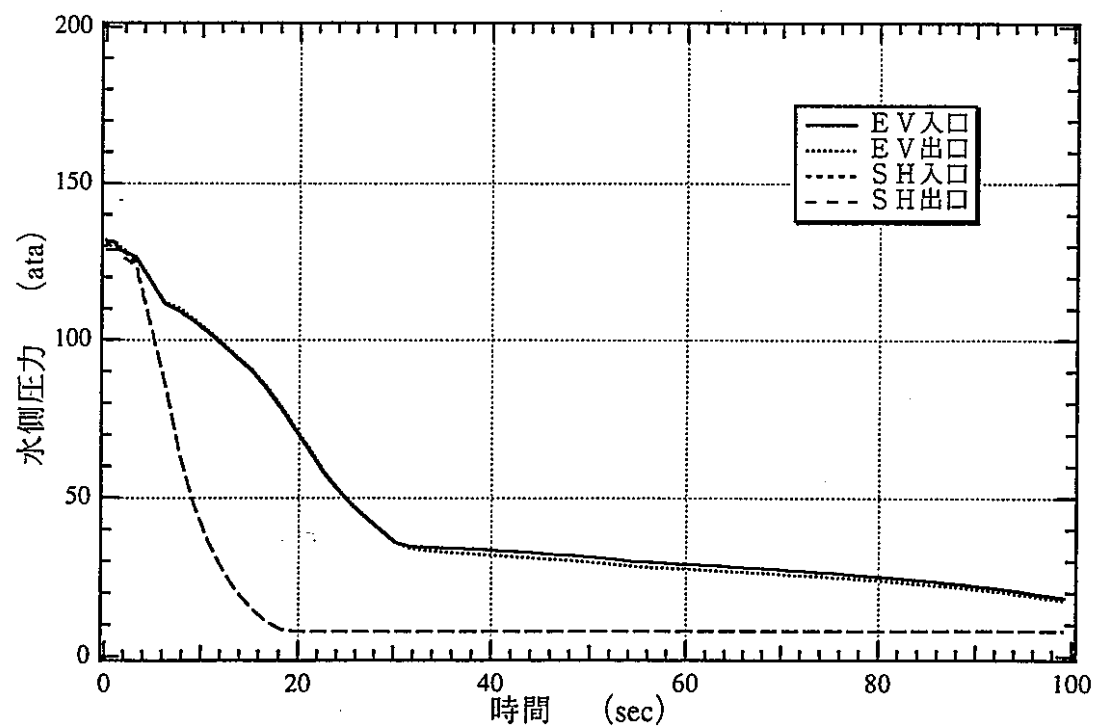


ケース5 (EV入口弁4B、EV出口弁 8B)

図2.4(5)-10 EV コイル下部熱伝達係数変化 (定格運転状態からのブロー)

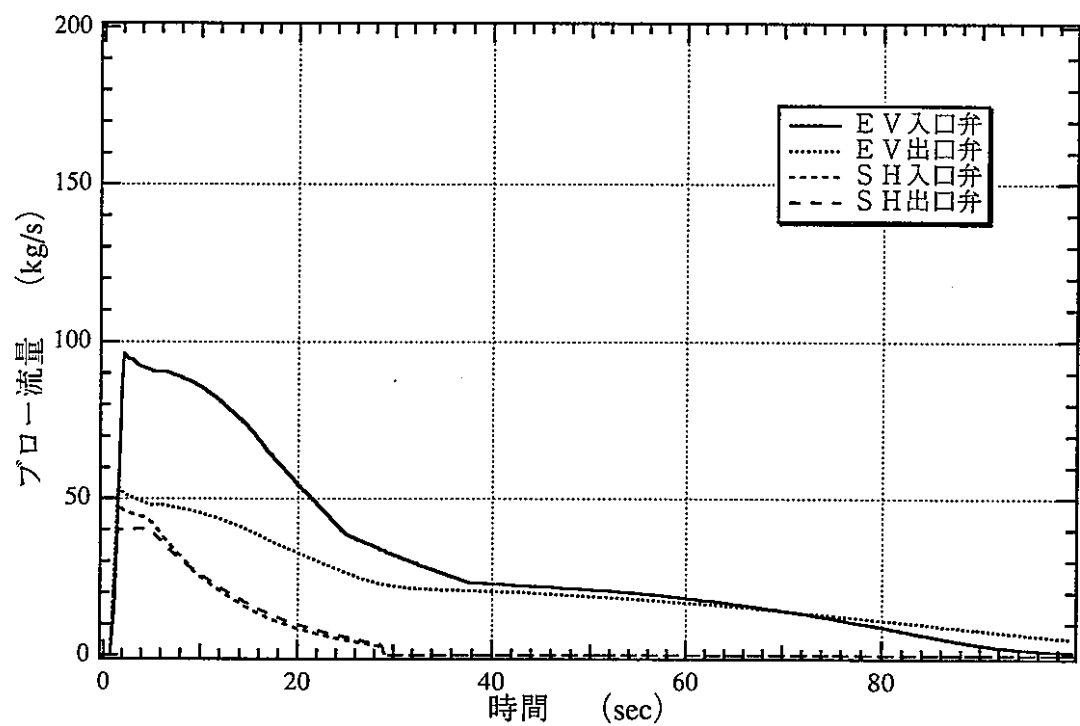


ケース1 (EV入口弁 3B、EV出口弁 4B) 定格運転からのブロー

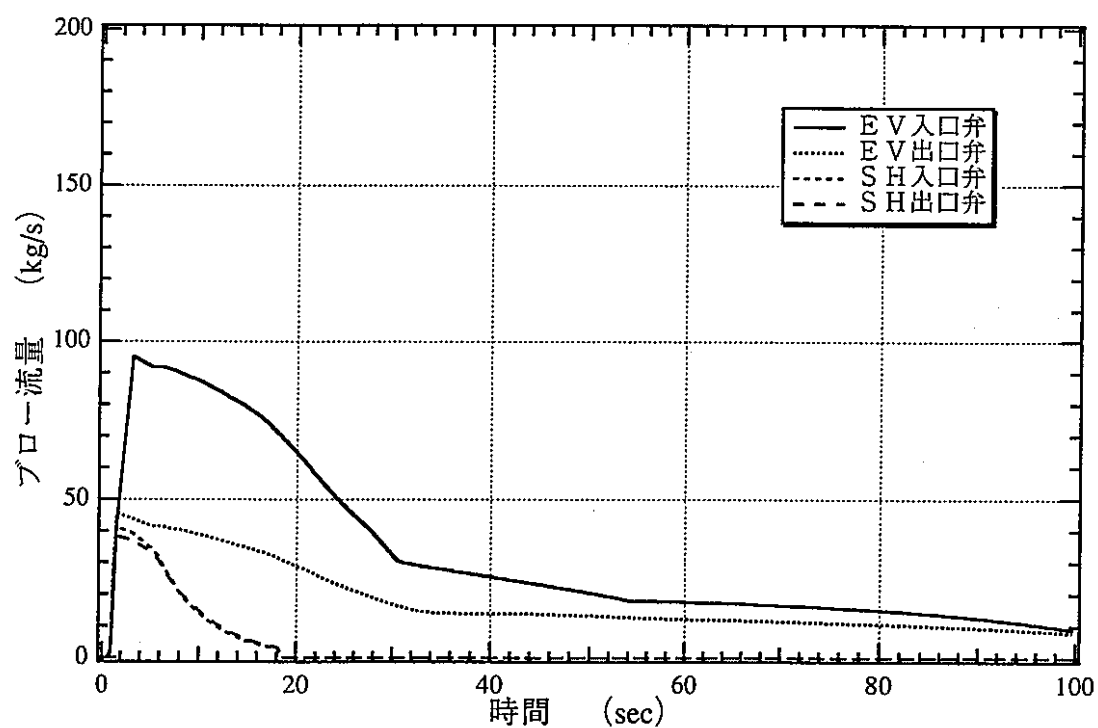


ケース6 (EV入口弁 3B、EV出口弁 4B) 40%運転からのブロー

図2.4(6)-1 SG 出入口圧力変化

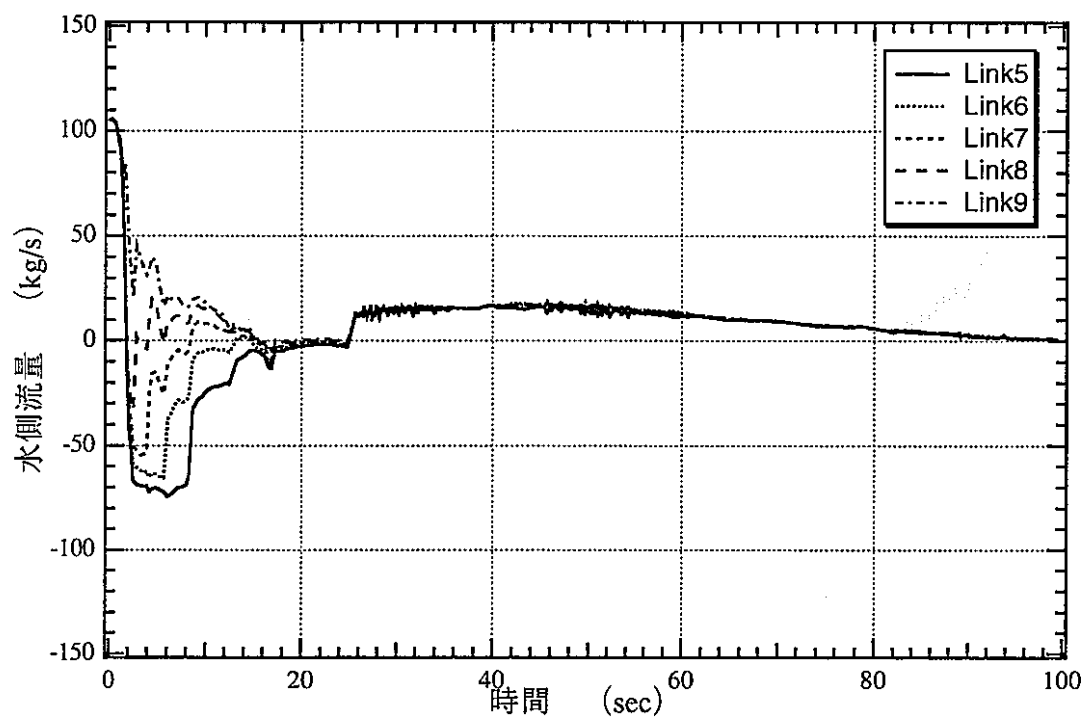


ケース1 (EV入口弁 3B、EV出口弁 4B) 定格運転からのブロー

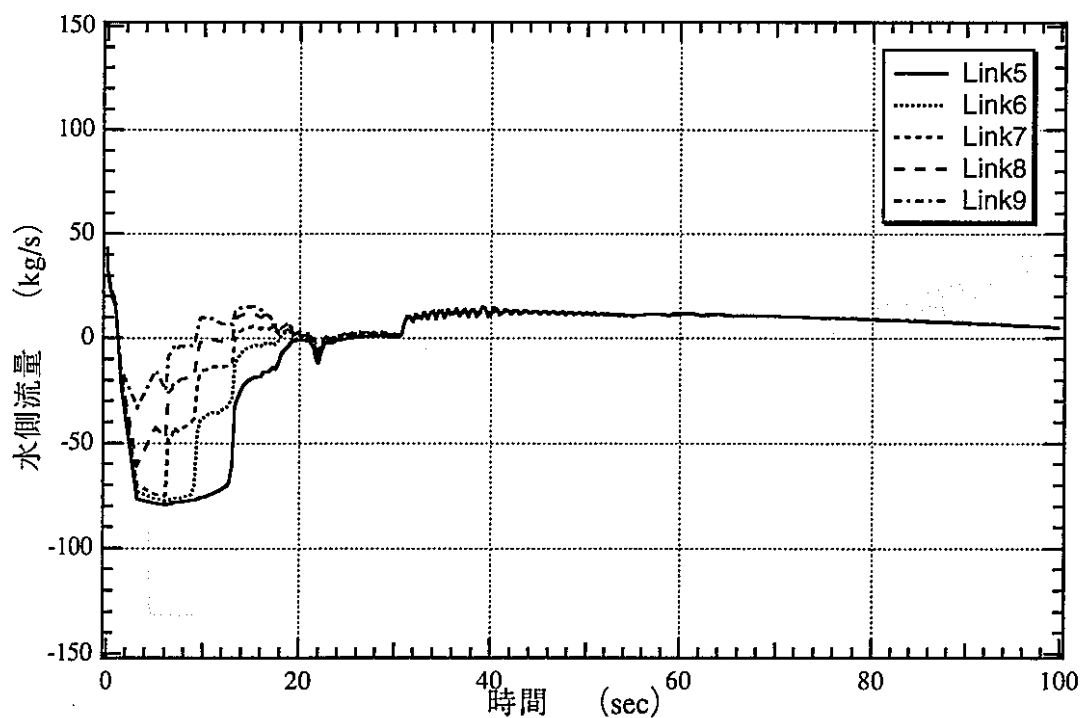


ケース6 (EV入口弁 3B、EV出口弁 4B) 40%運転からのブロー

図2.4(6)-2 SG 出入口放出弁流量

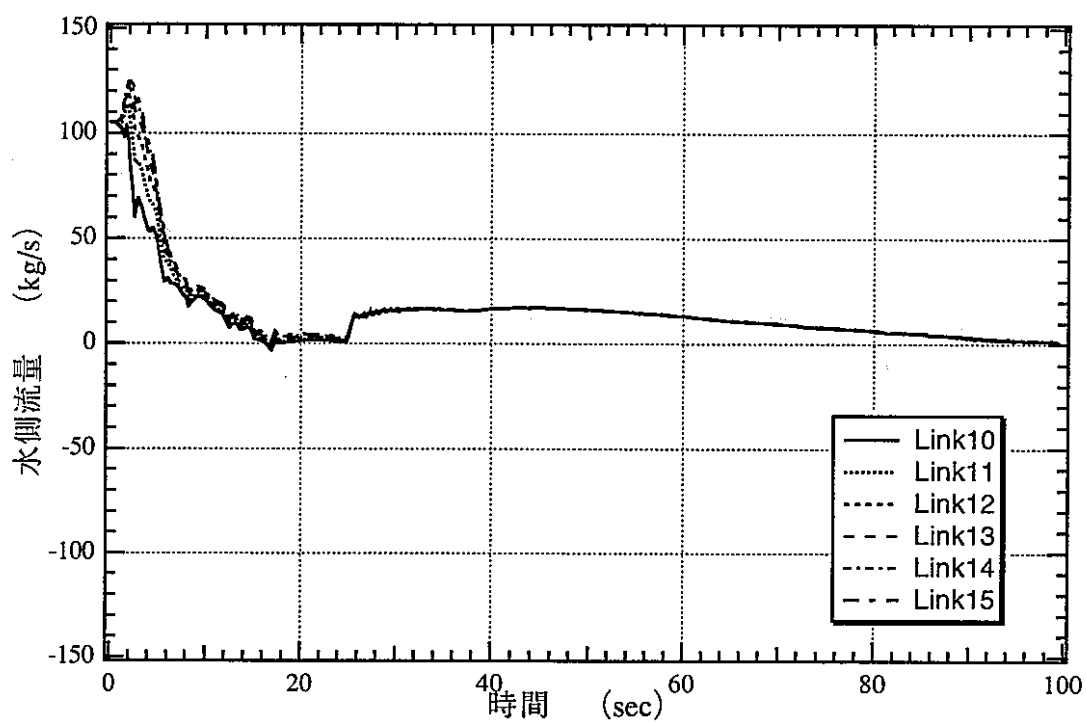


ケース1 (EV入口弁 3B、EV出口弁 4B) 定格運転からのブロー

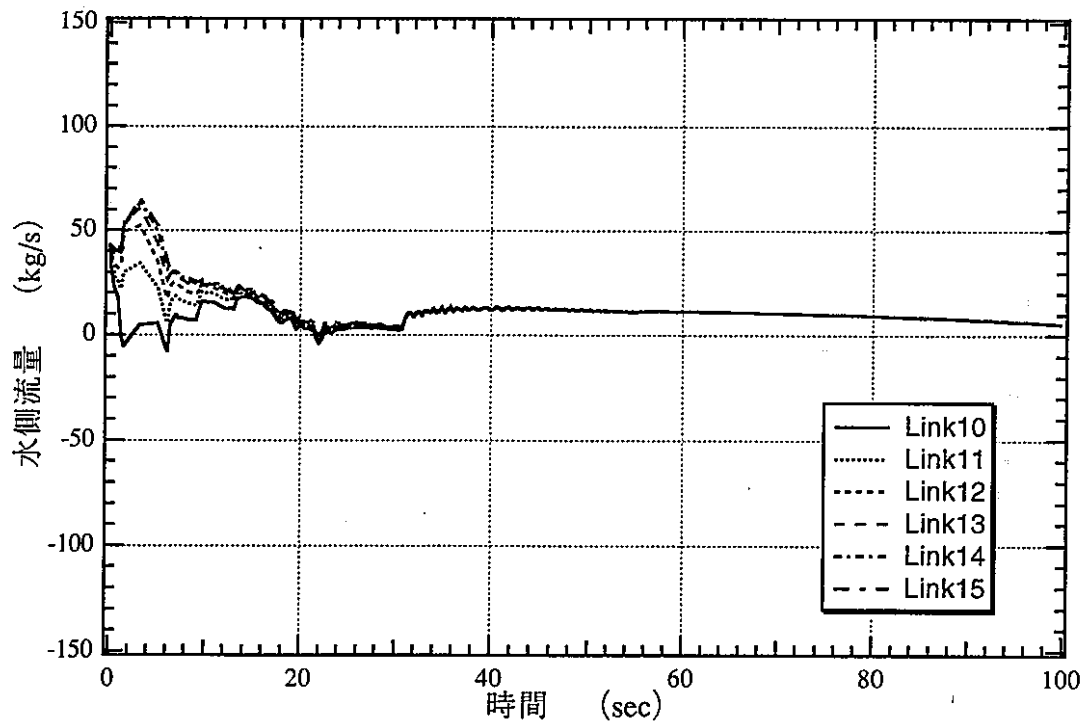


ケース6 (EV入口弁 3B、EV出口弁 4B) 40%運転からのブロー

図2.4(6)-3 EV コイル下部流量変化

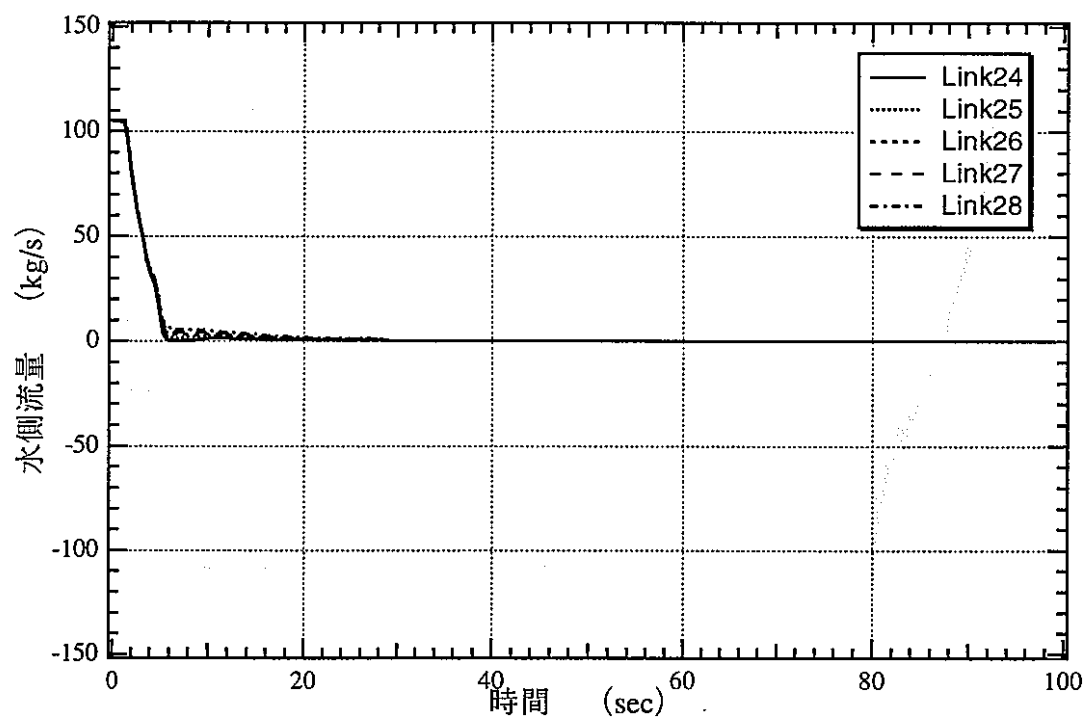


ケース1 (EV入口弁 3B、EV出口弁 4B) 定格運転からのブロー

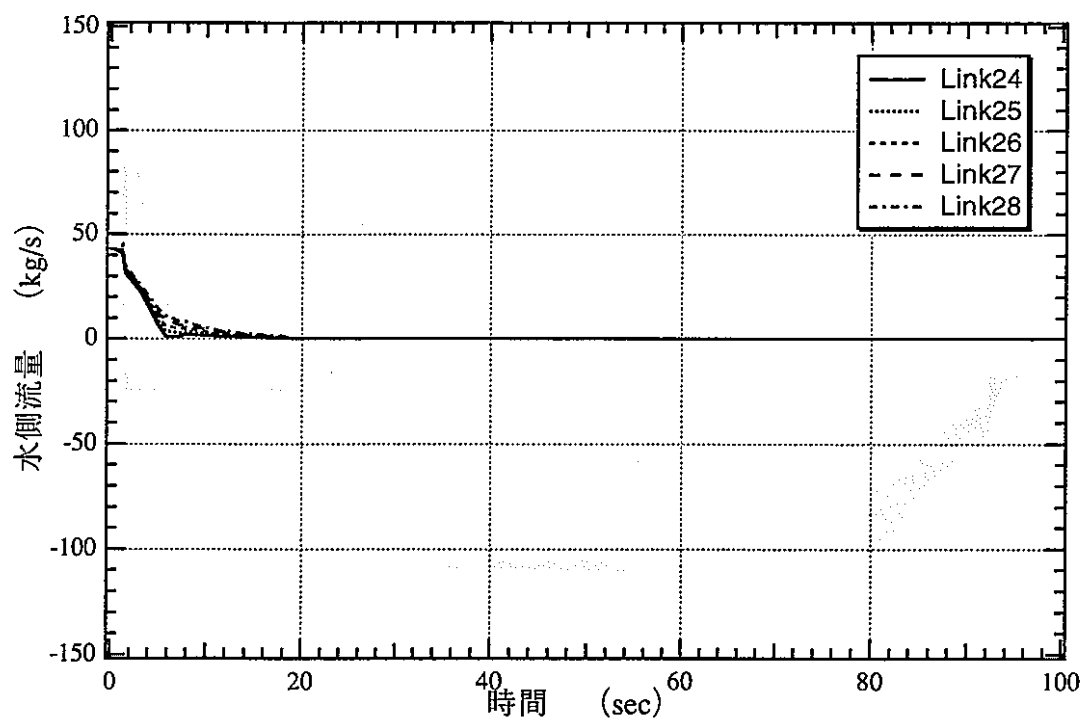


ケース6 (EV入口弁 3B、EV出口弁 4B) 40%運転からのブロー

図2.4(6)-4 EV 管束部上部流量変化



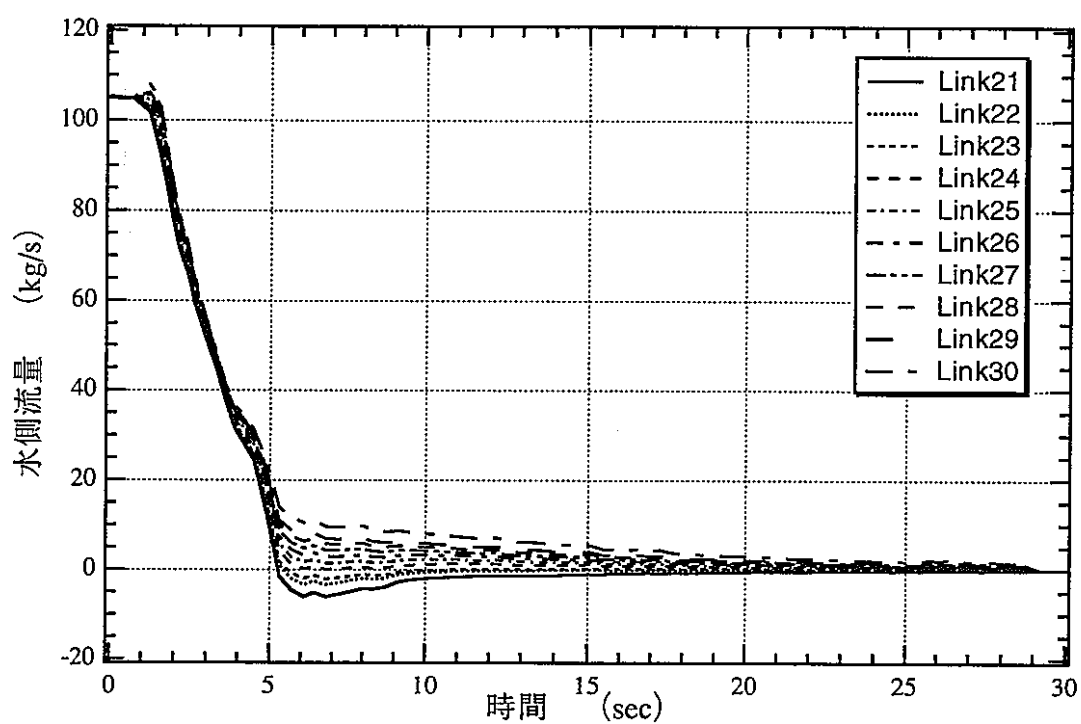
ケース1 (BLOPH) 定格運転からのブロー



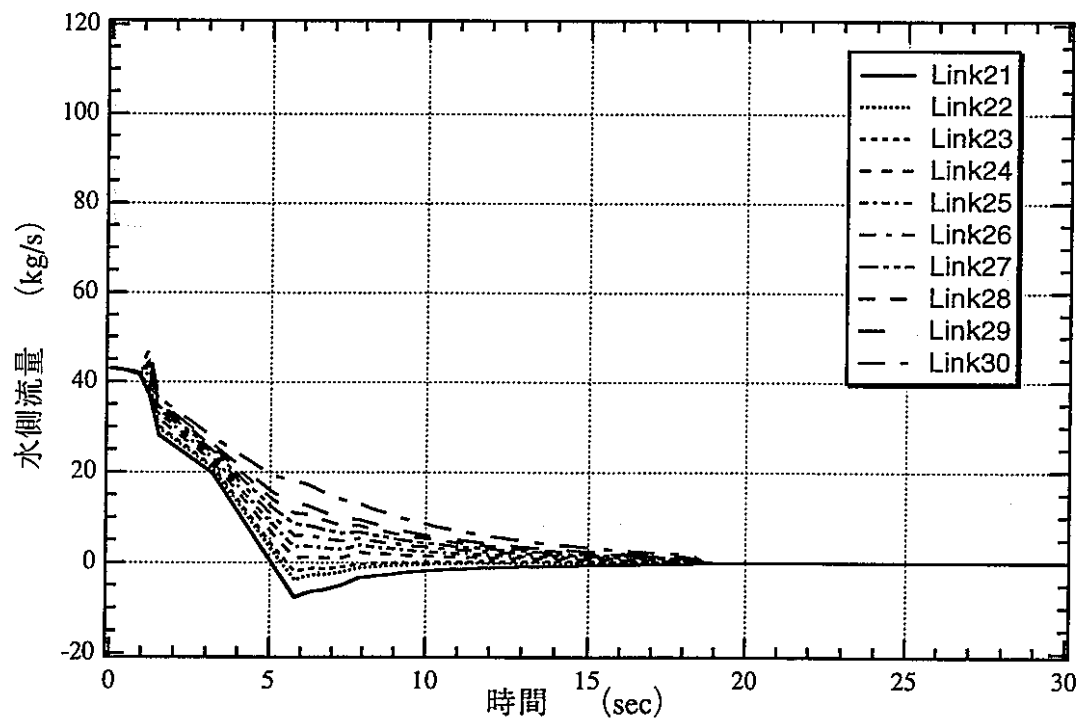
ケース6 (BLOPH) 40%運転からのブロー

図2.4(6)-5 SH コイル流量変化



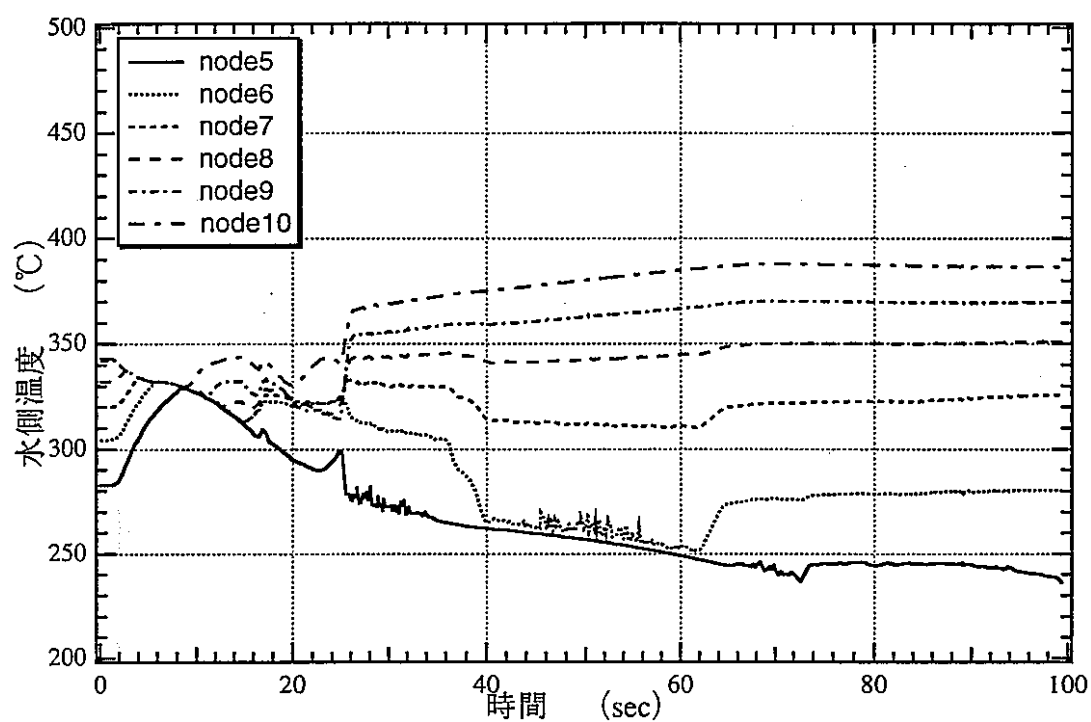


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B) 定格運転からのブロー

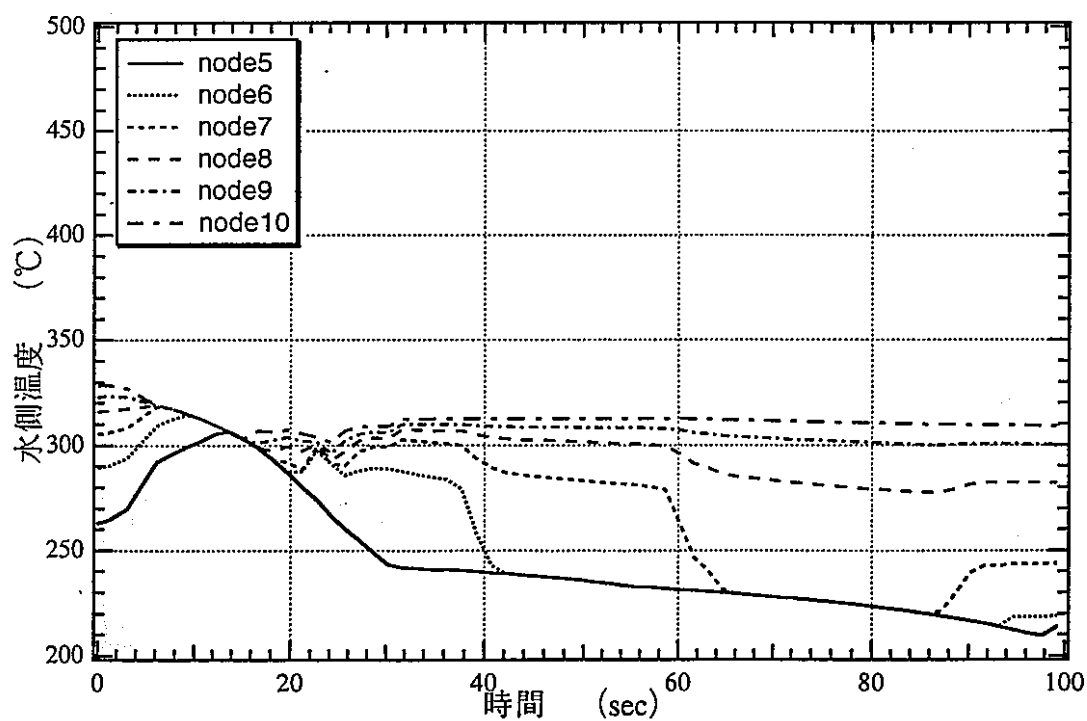


ケース6 (EV入口弁3B、EV出口弁4B) 40%運転からのブロー

図2.4(6)-6 SH コイル部流量変化

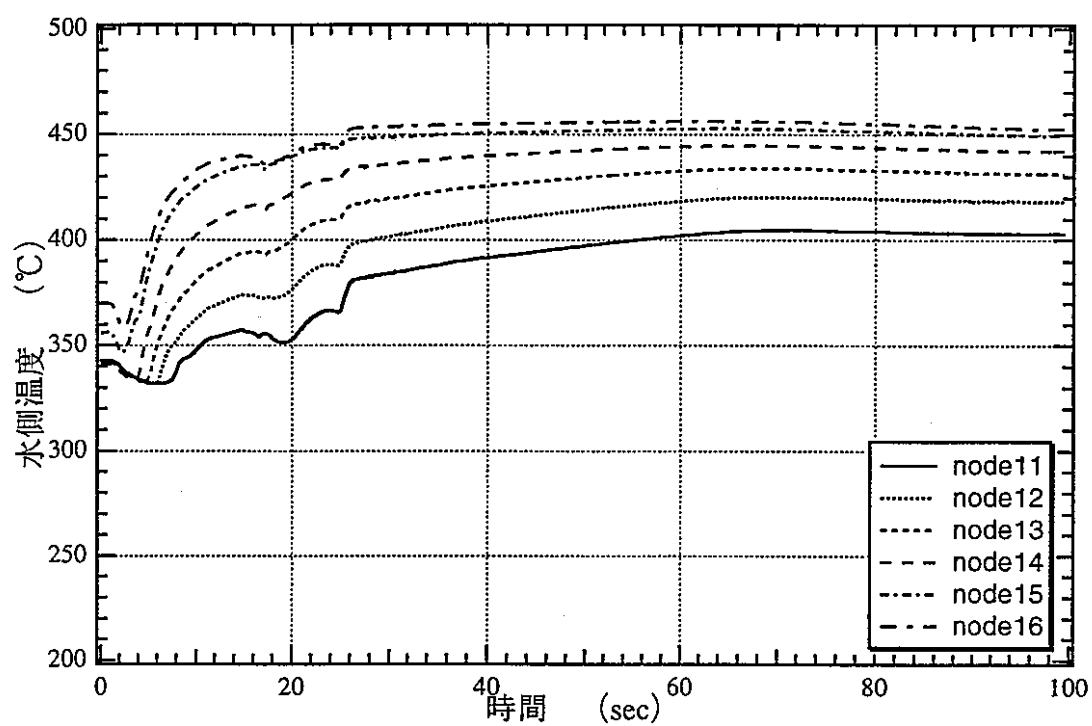


ケース1 (EV入口弁 3B、EV出口弁 4B) 定格運転からのブロー

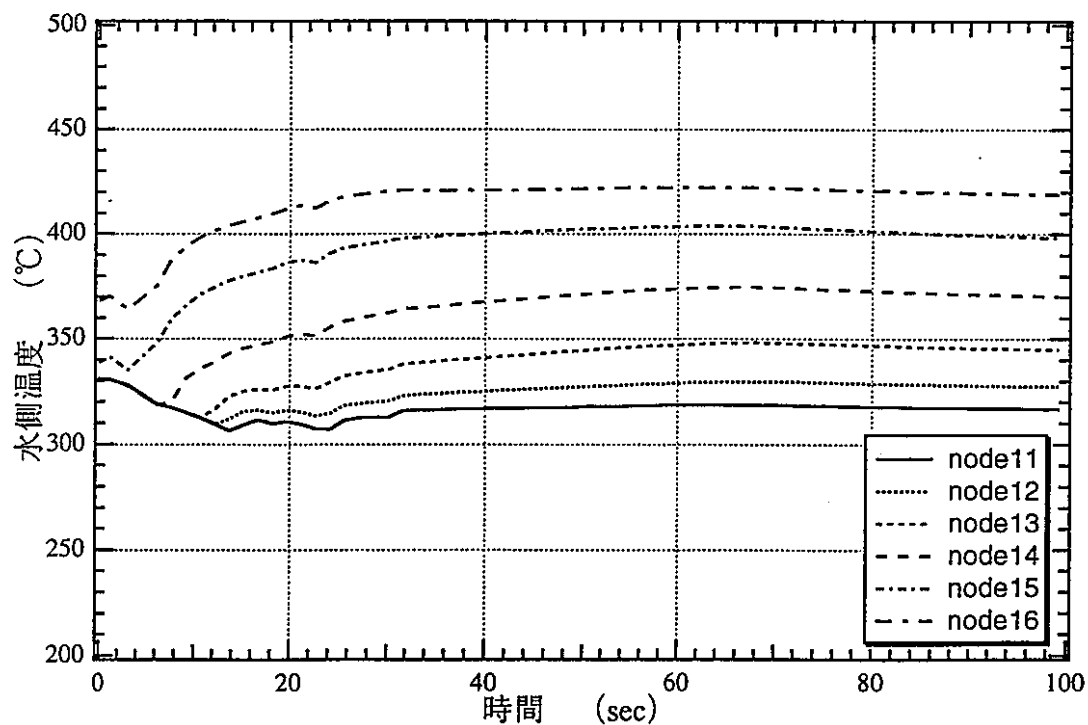


ケース6 (EV入口弁 3B、EV出口弁 4B) 40%運転からのブロー

図2.4(6)-7 EV コイル下部温度変化

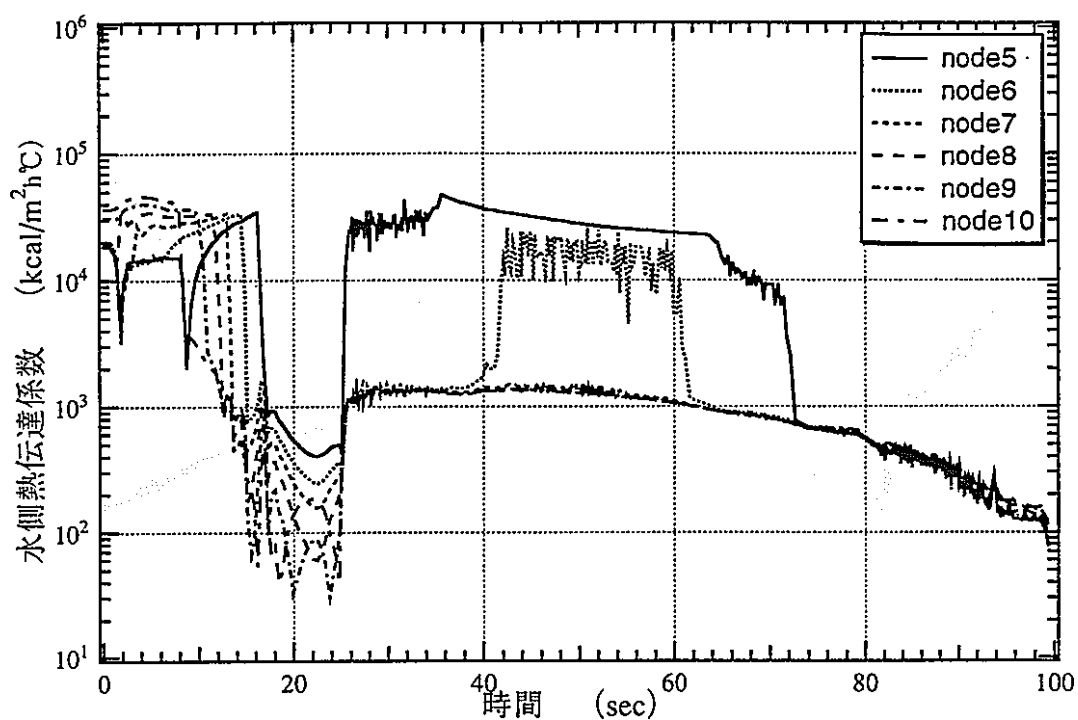


ケース1 (EV入口弁 3B、EV出口弁 4B) 定格運転からのブロー

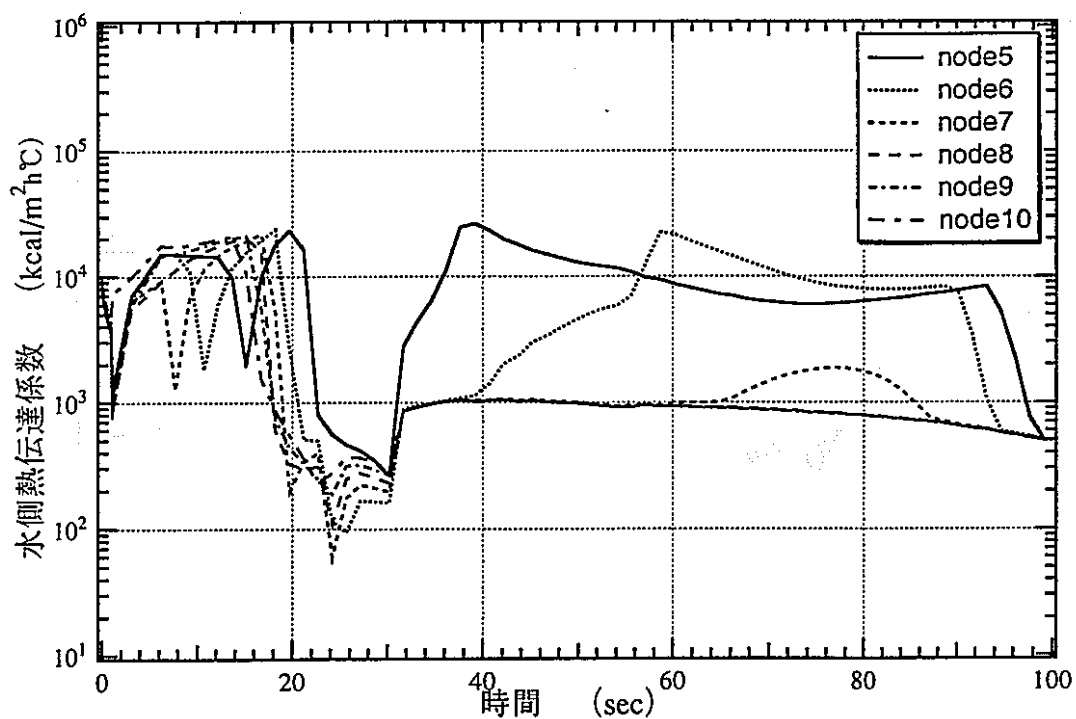


ケース6 (EV入口弁 3B、EV出口弁 4B) 40%運転からのブロー

図2.4(6)-8 EV コイル上部温度変化

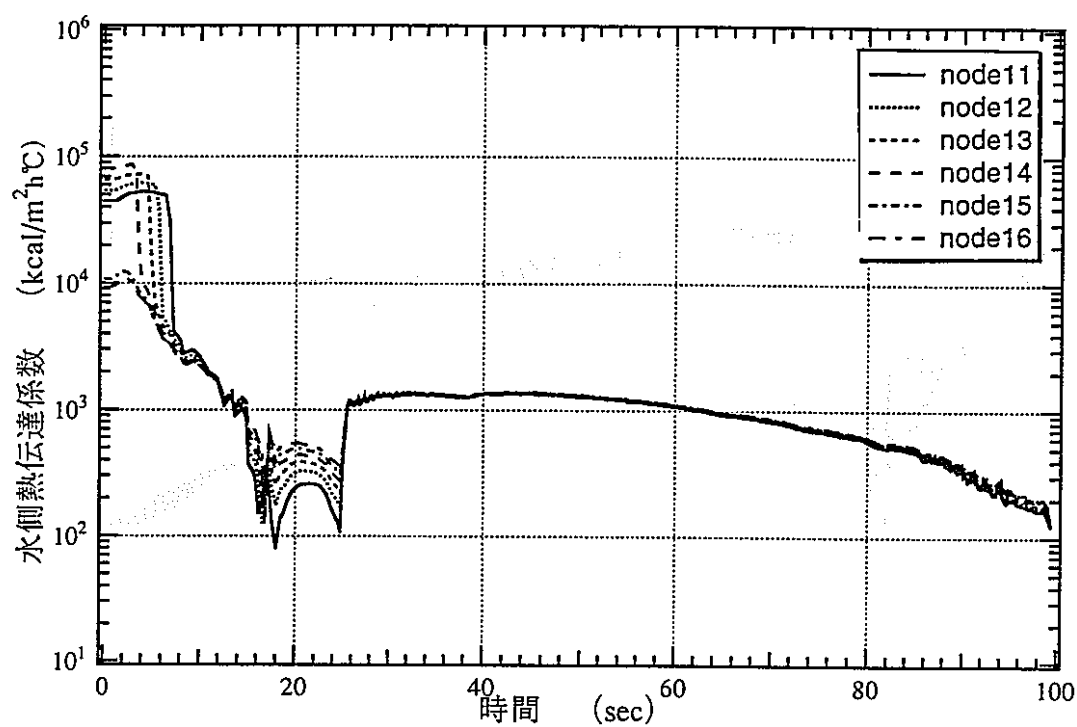


ケース1 (EV入口弁 3B、EV出口弁 4B) 定格運転からのブロー

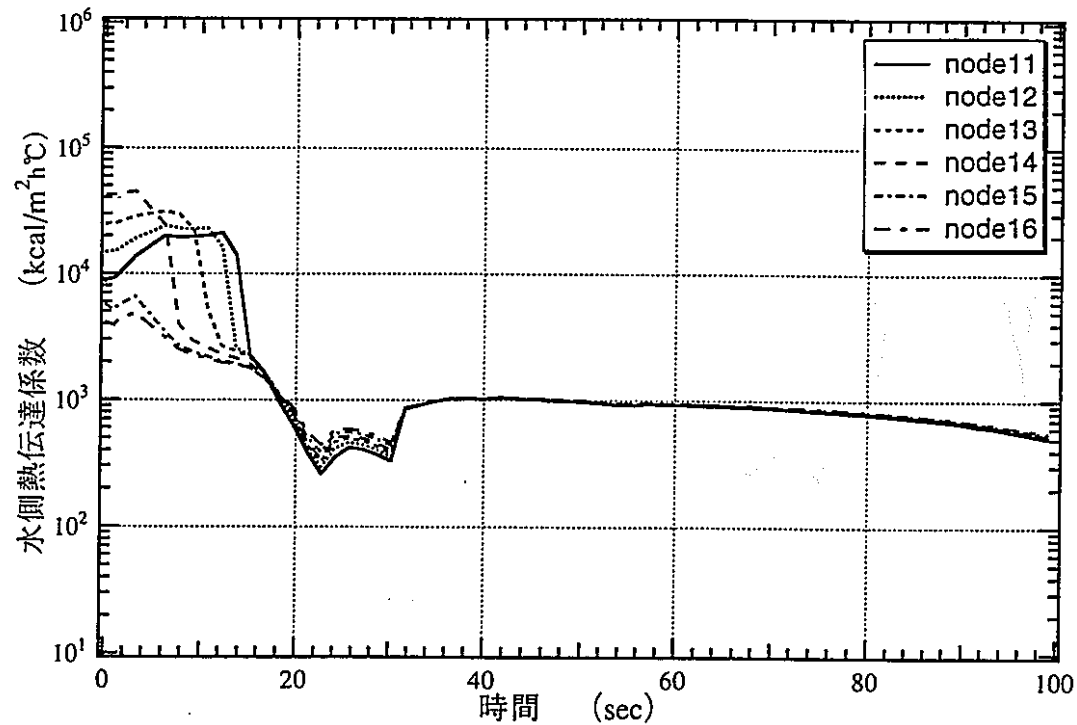


ケース6 (EV入口弁 3B、EV出口弁 4B) 40%運転からのブロー

図2.4(6)-9 EV コイル下部熱伝達係数変化

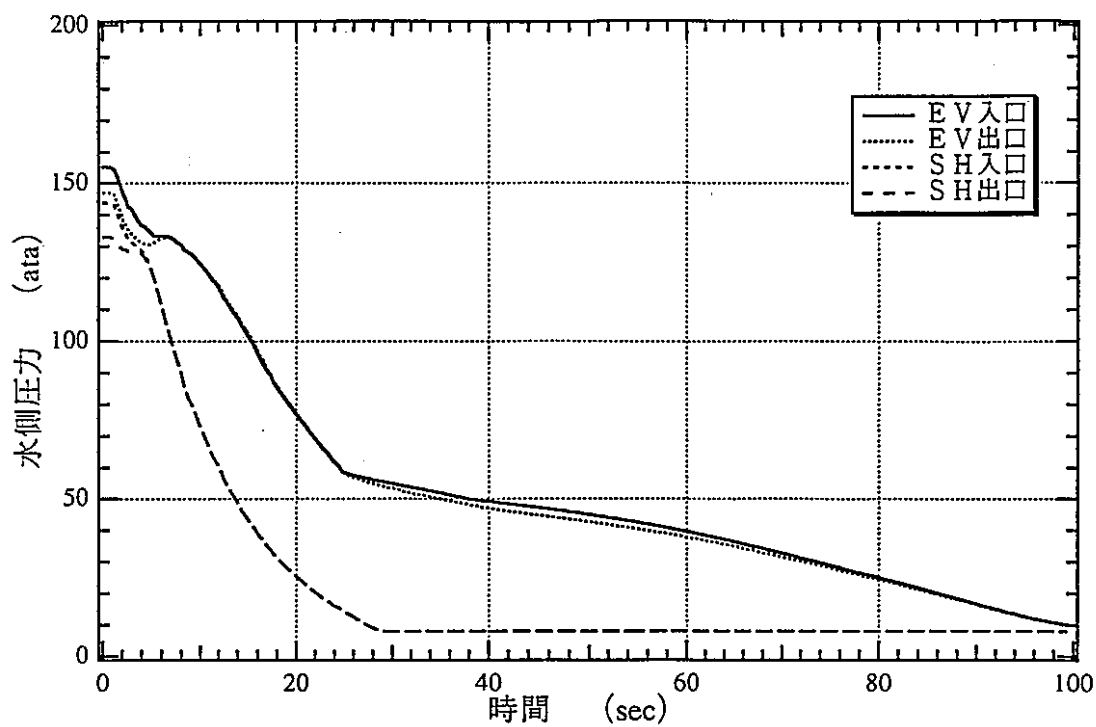


ケース1 (EV入口弁 3B、EV出口弁 4B) 定格運転からのブロー

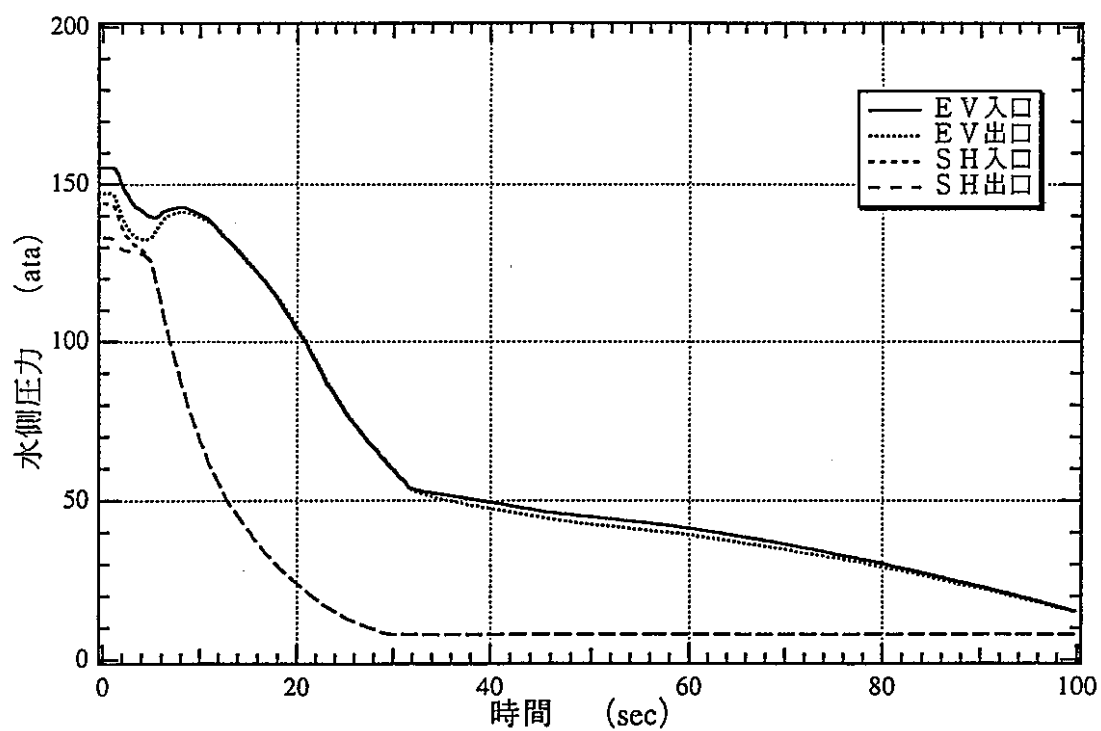


ケース6 (EV入口弁 3B、EV出口弁 4B) 40%運転からのブロー

図2.4(6)-10 EV コイル下部熱伝達係数変化

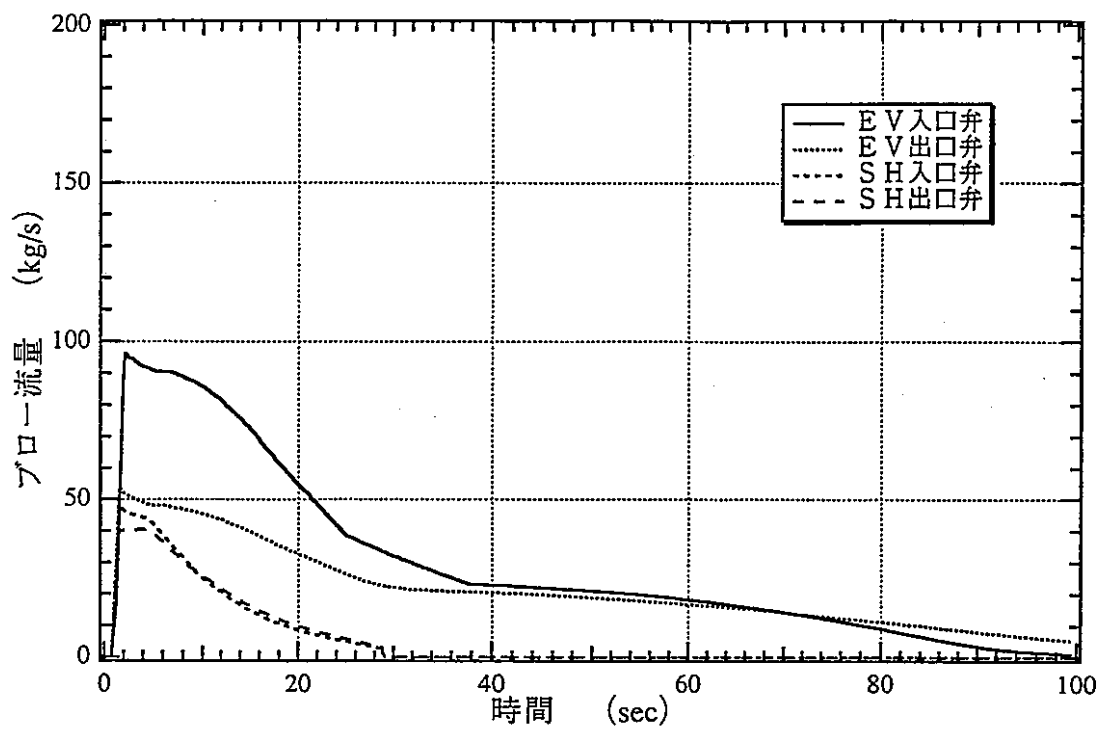


ケース 1 (BLOPH)

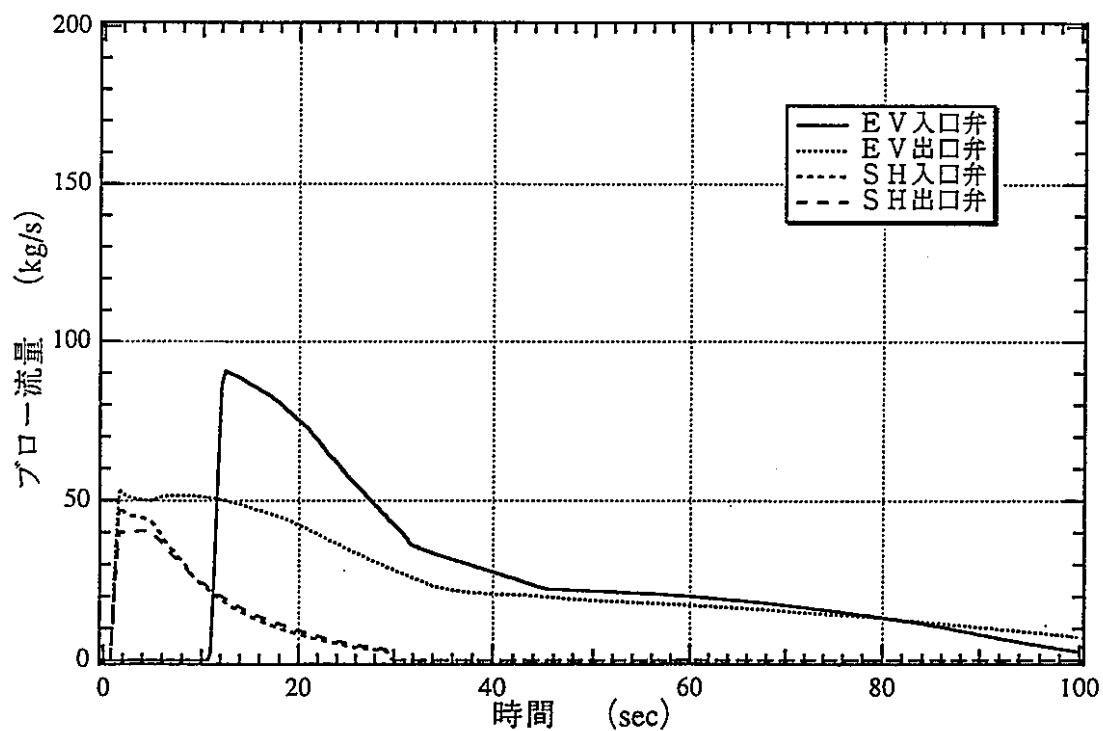


ケース 7 (BLOPH) (EV 入口放出弁開時刻 10 sec 遅れ)

図2.4(7)-1 SG 出入口圧力変化 (定格運転状態からのブロー)

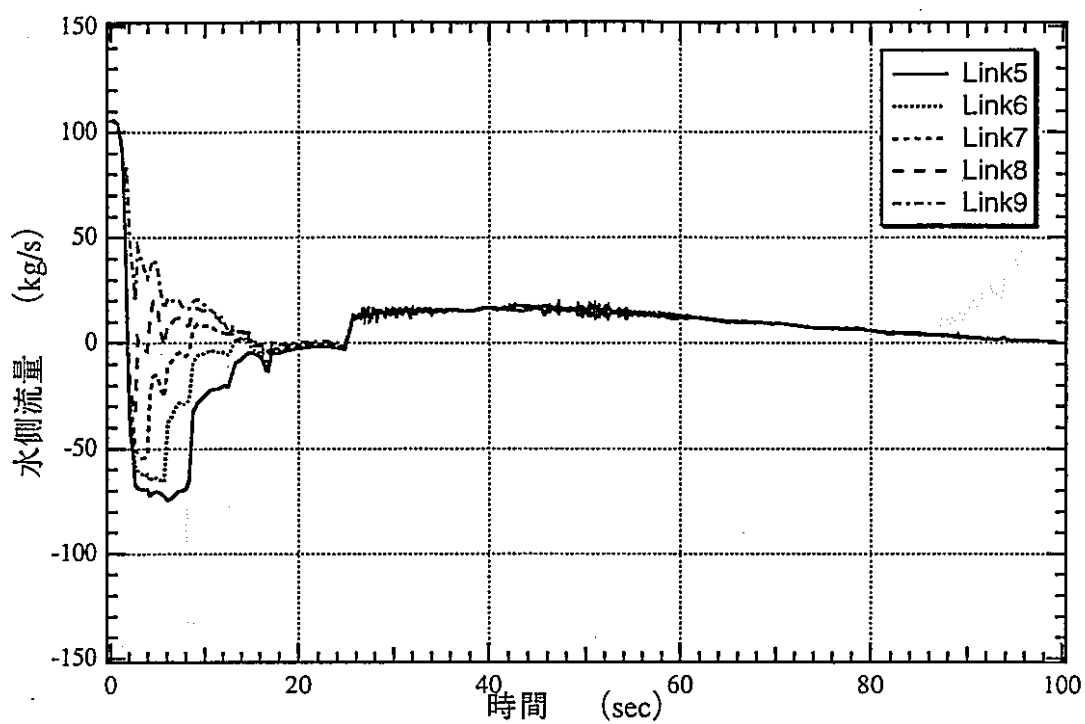


ケース 1 (BLOOPH)

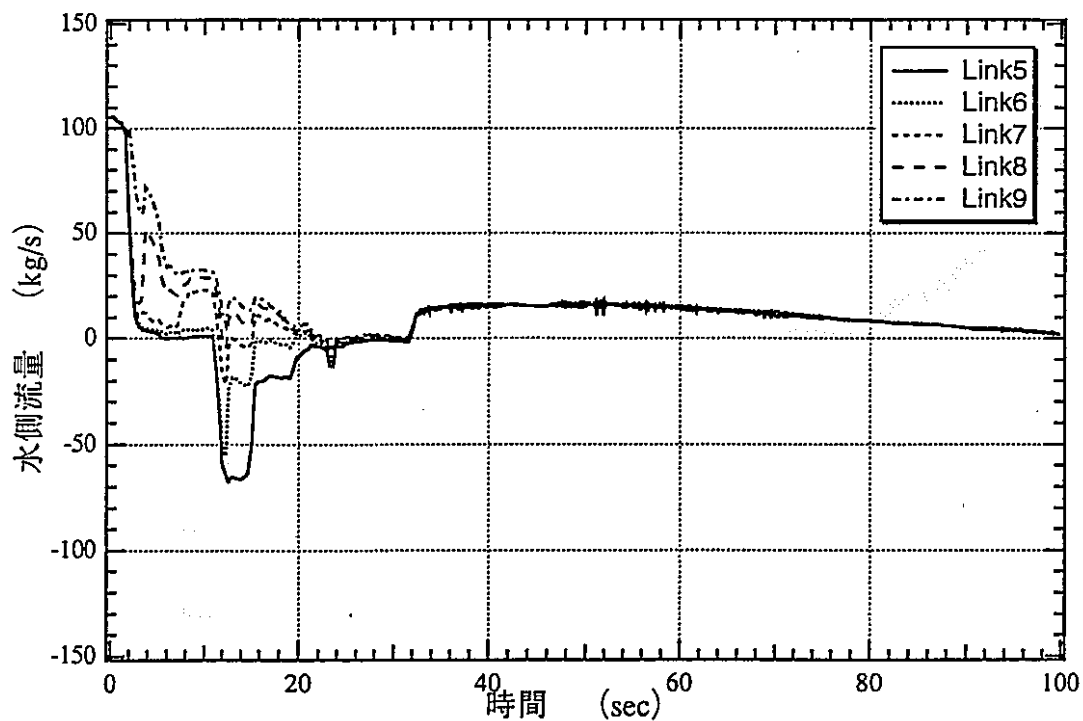


ケース 7 (BLOOPH) (EV 入口放出弁開時刻 10 sec 遅れ)

図2.4(7)-2 SG 出入口放出弁流量 (定格運転状態からのブロー)



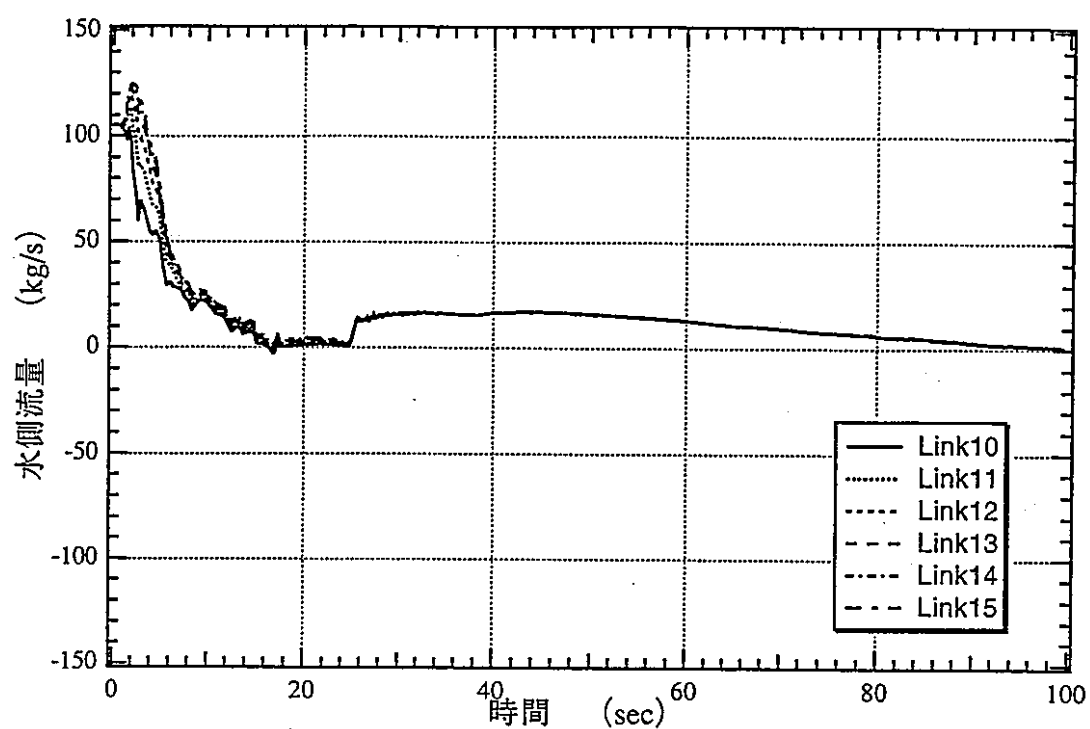
ケース 1 (BLOOPH)



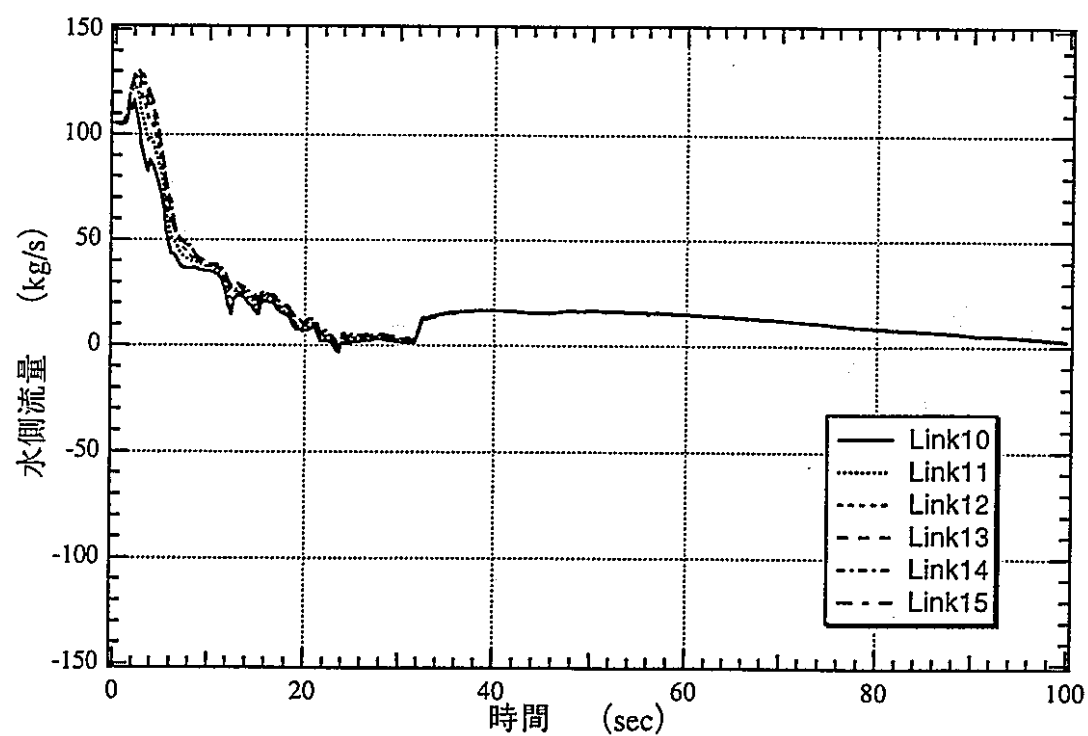
ケース 7 (BLOOPH) (EV 入口放出弁開時刻 10 sec 遅れ)

図2.4(7)-3 EV コイル下部流量変化 (定格運転状態からのブロー)



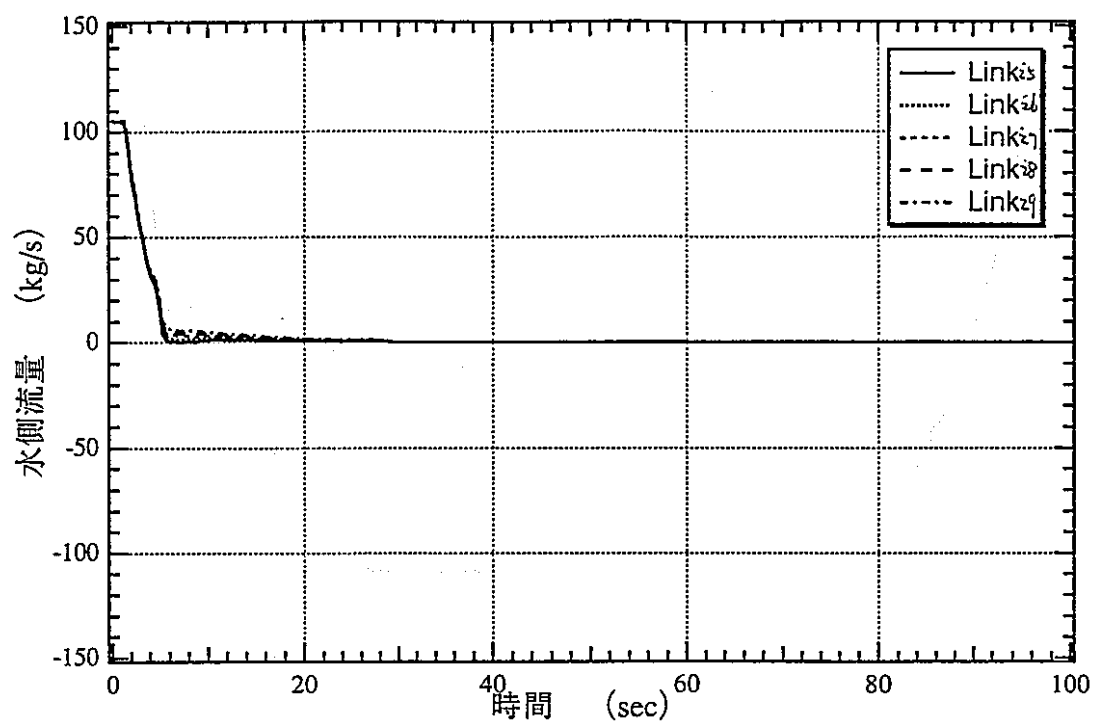


ケース 1 (BLOOPH)

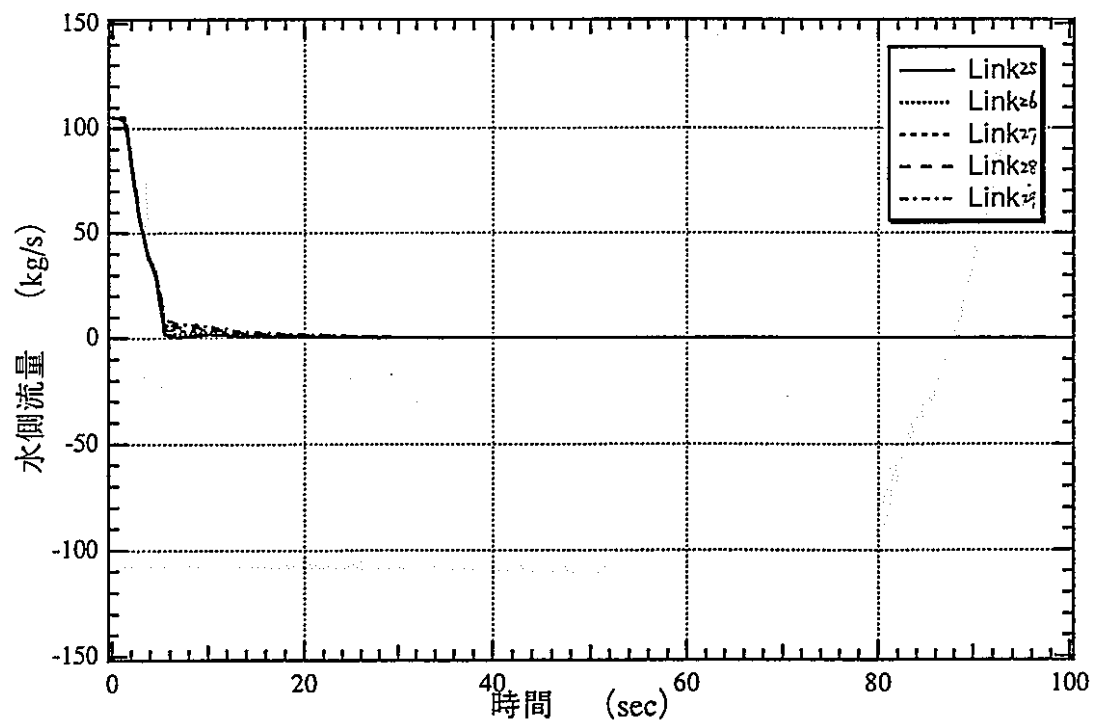


ケース 7 (BLOOPH) (EV 入口放出弁開時刻 10 sec 遅れ)

図2.4(7)-4 EV 管束部上部流量変化 (定格運転状態からのブロー)

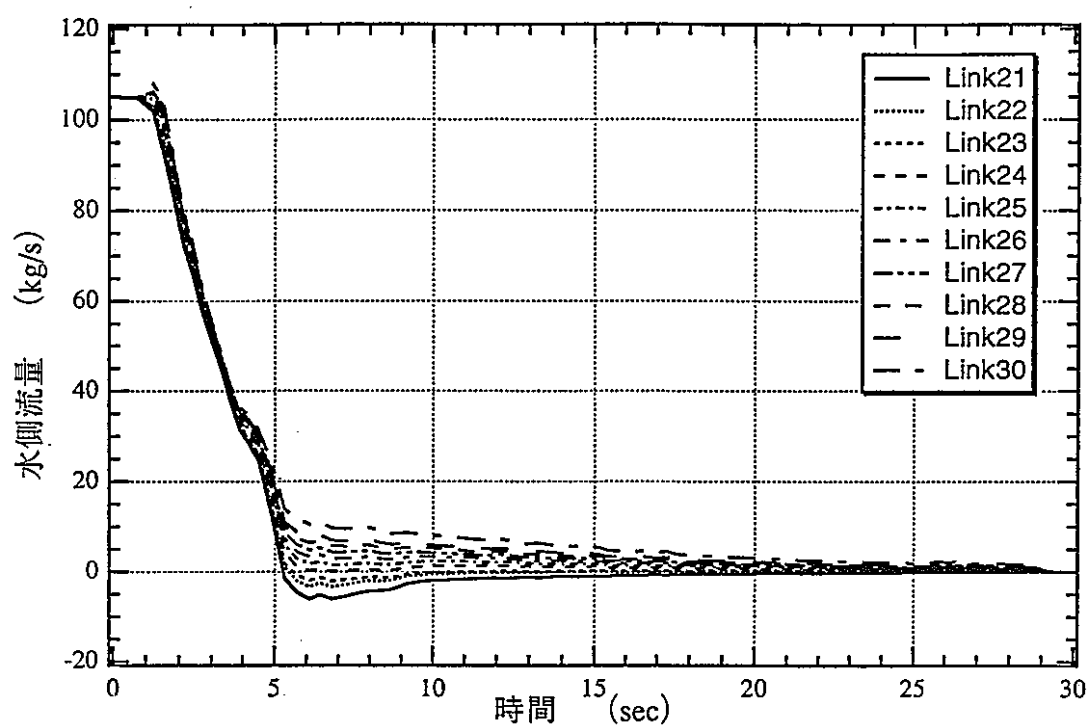


ケース 1 (BLOOPH)

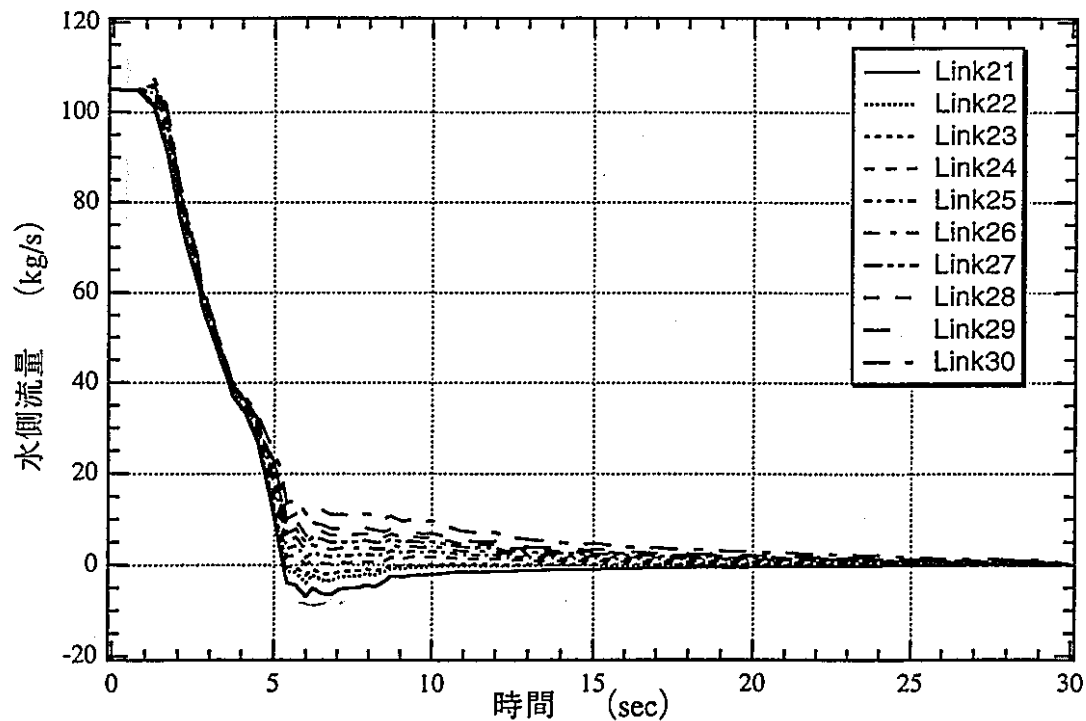


ケース 7 (BLOOPH) (EV 入口放出弁開時刻 10 sec 遅れ)

図2.4(7)-5 SH コイル流量変化 (定格運転状態からのブロー)



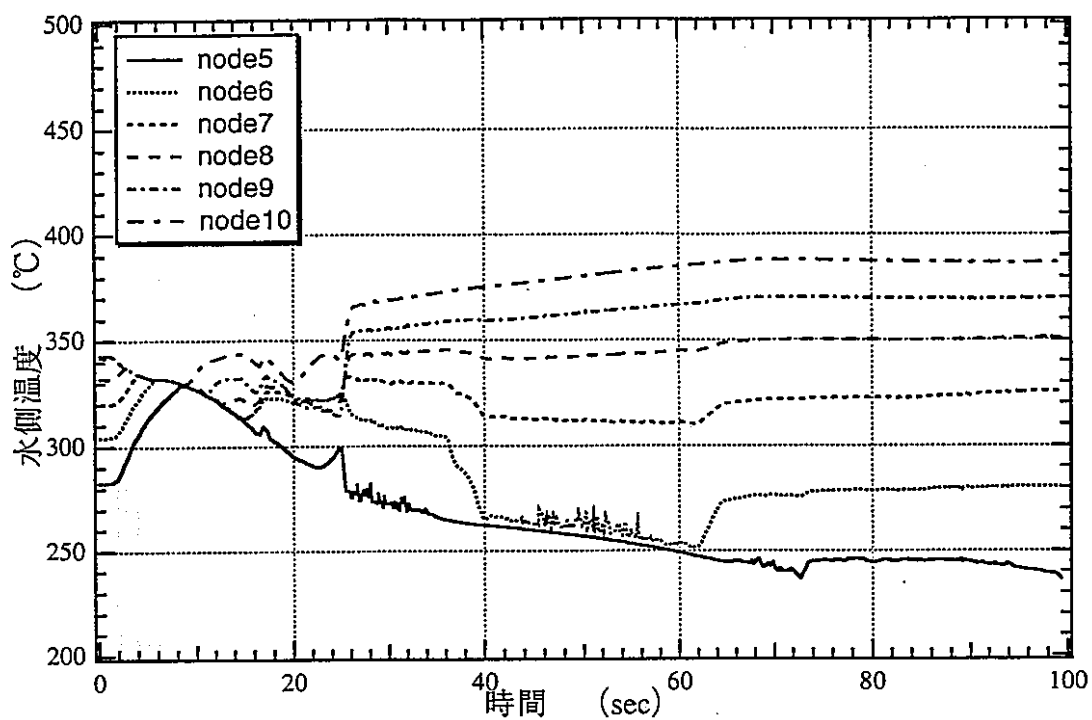
ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)



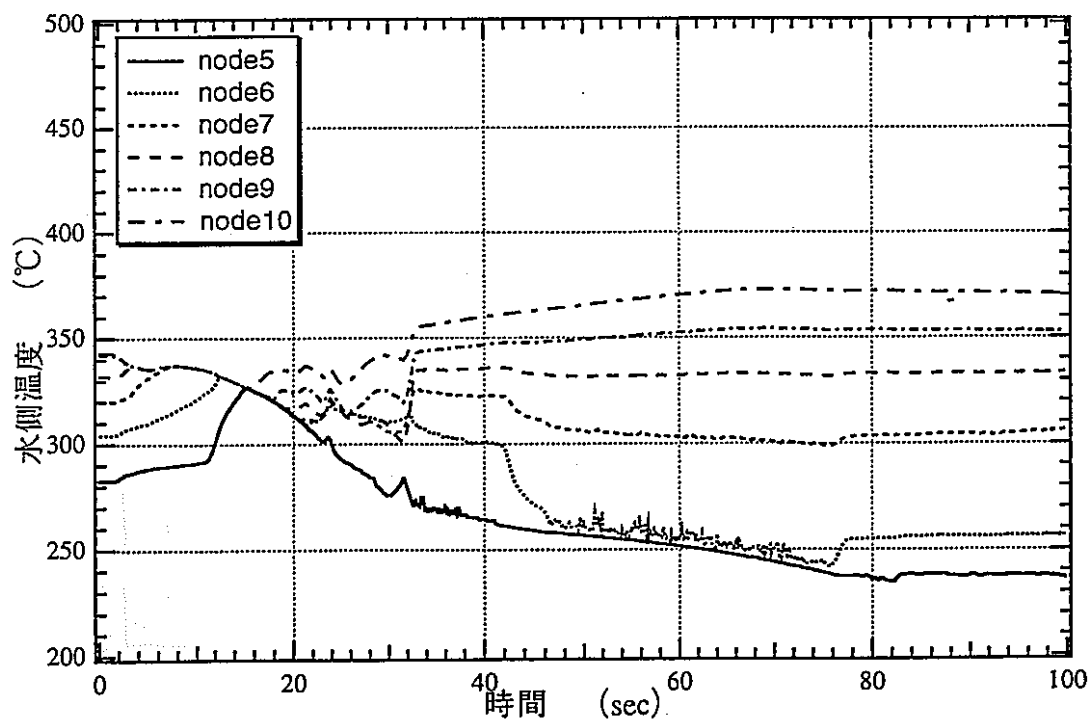
ケース7 (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

(EV 入口放出弁開時刻 10 sec 遅れ)

図2.4(7)-6 SH コイル部流量変化 (定格運転状態からのブロー)

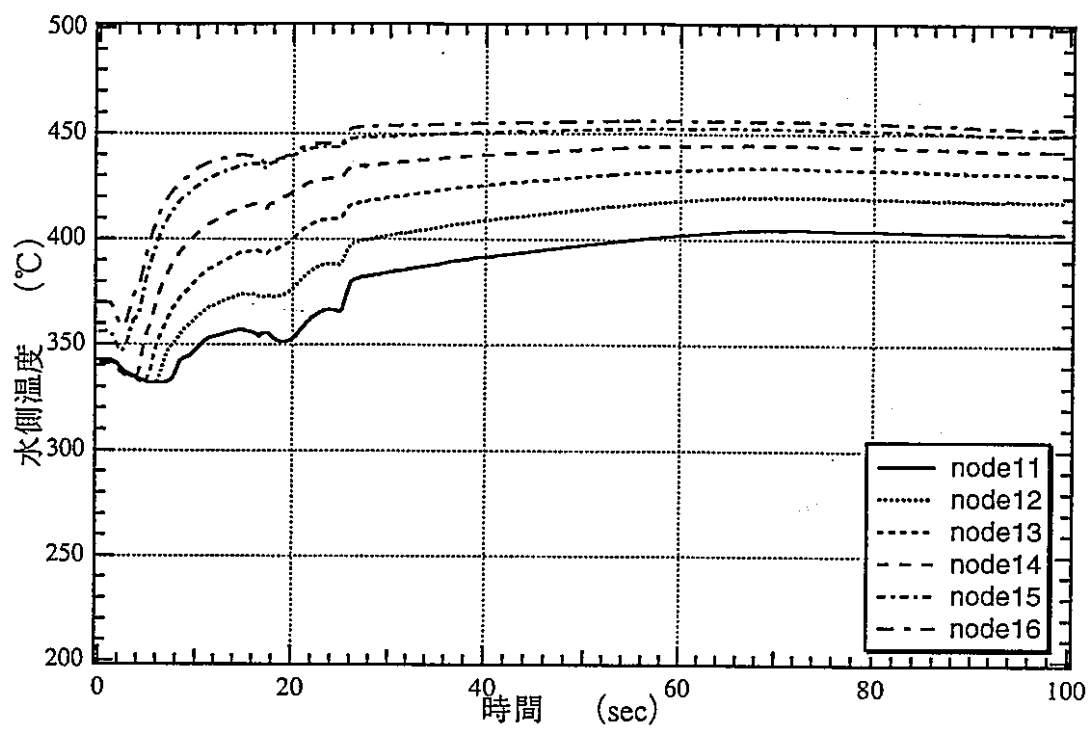


ケース 1 (BLOOPH)

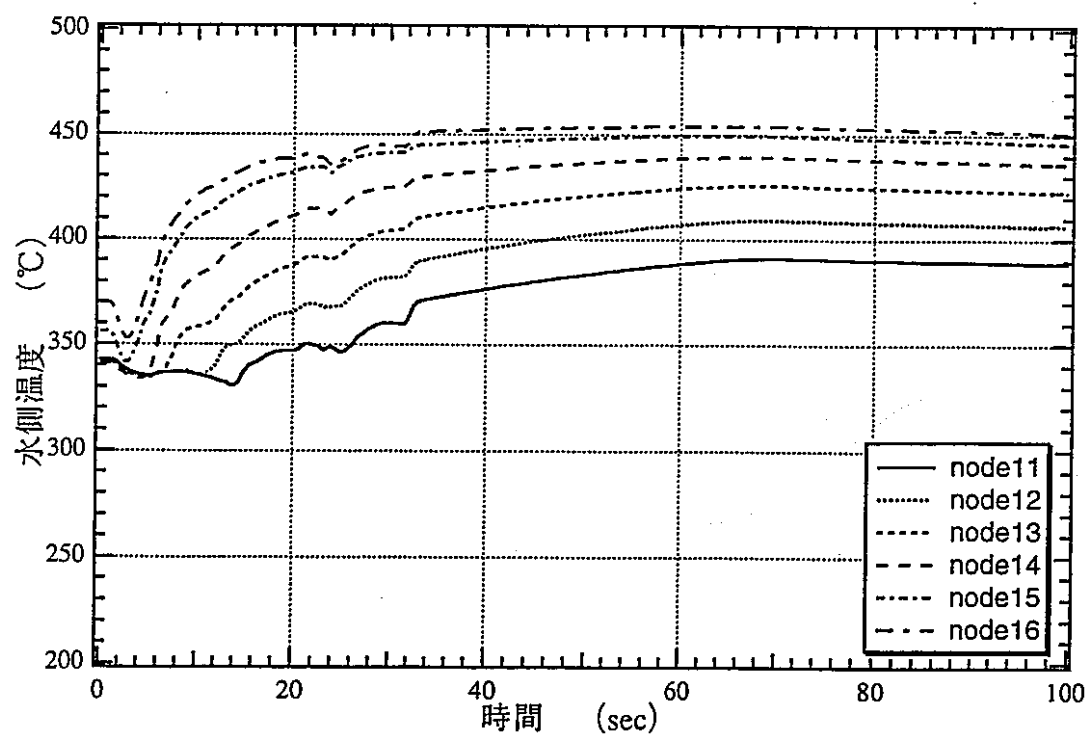


ケース 7 (BLOOPH) (EV 入口放出弁開時刻 10 sec 遅れ)

図2.4(7)-7 EV コイル下部温度変化 (定格運転状態からのブロー)

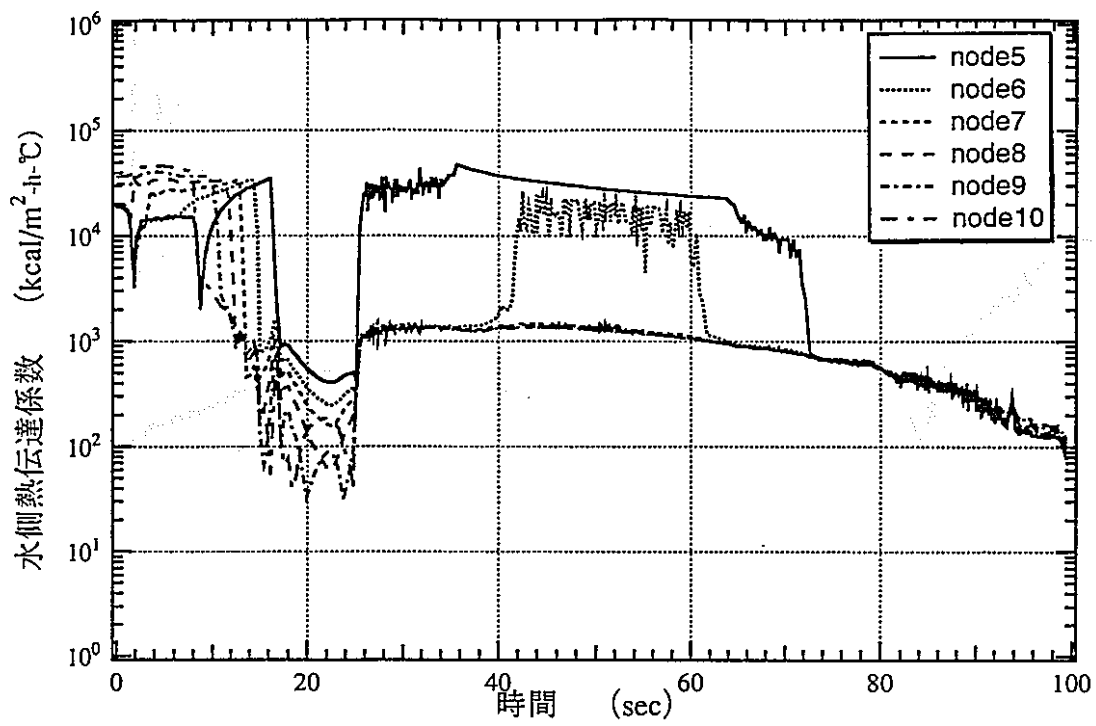


ケース 1 (BLOOPH)

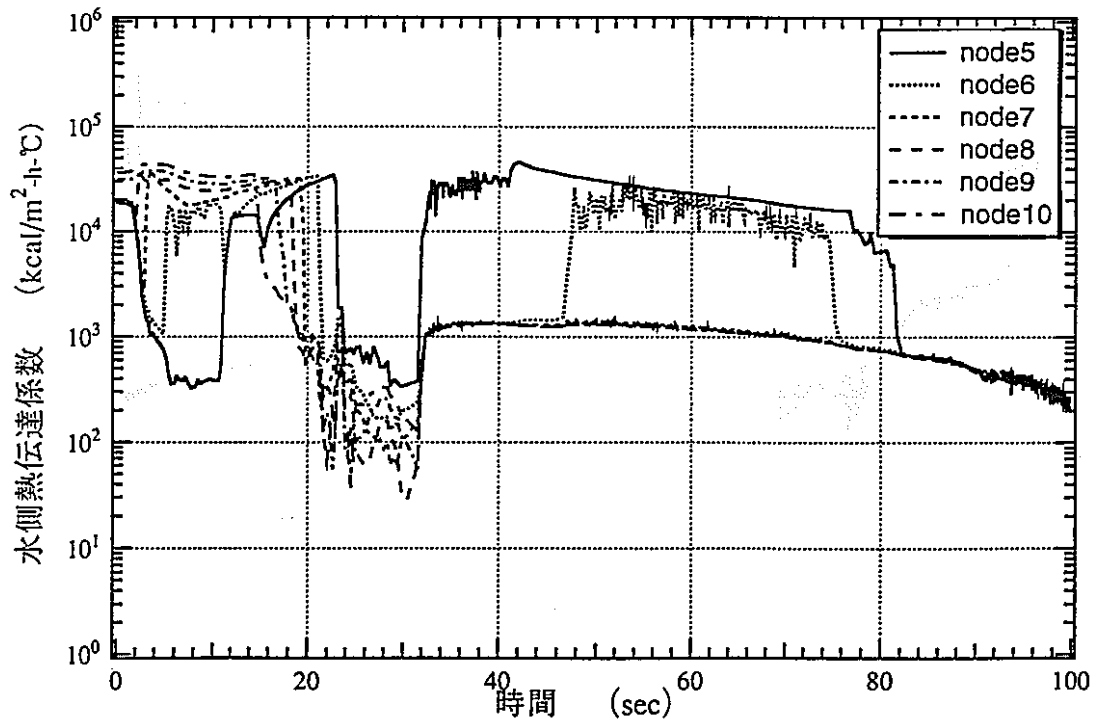


ケース 7: (BLOOPH) (EV 入口放出弁開時刻 10 sec 遅れ)

図2.4(7)-8 EV コイル上部温度変化 (定格運転状態からのブロー)

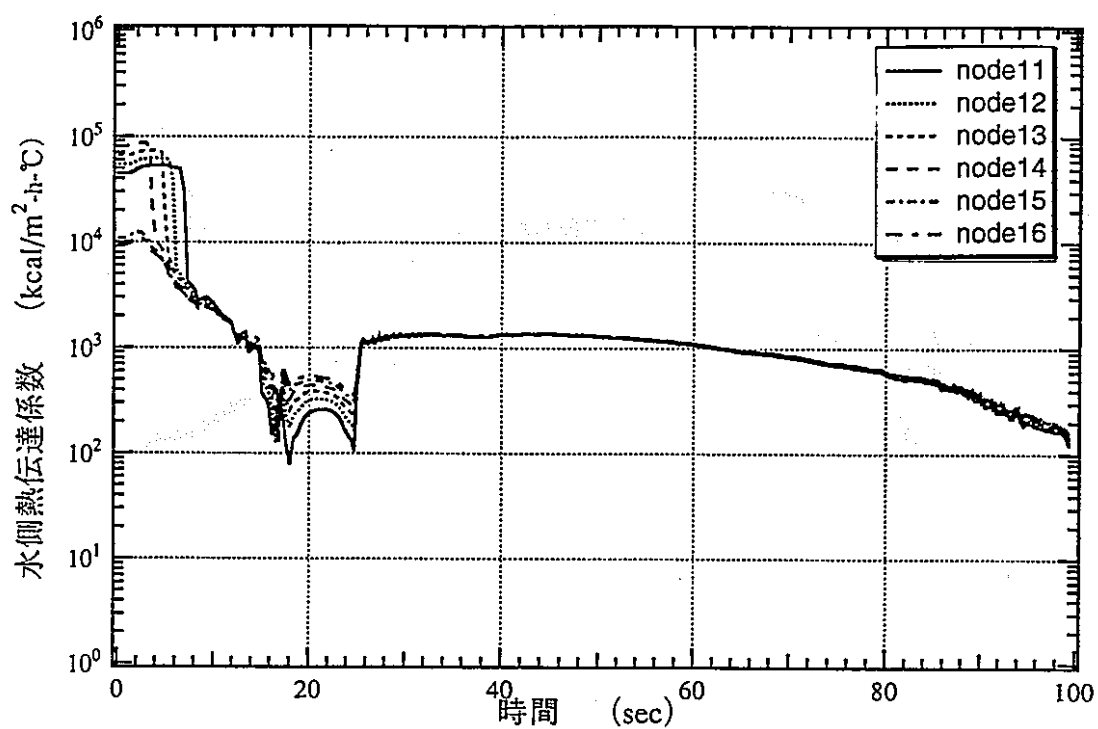


ケース 1 (BLOOPH)

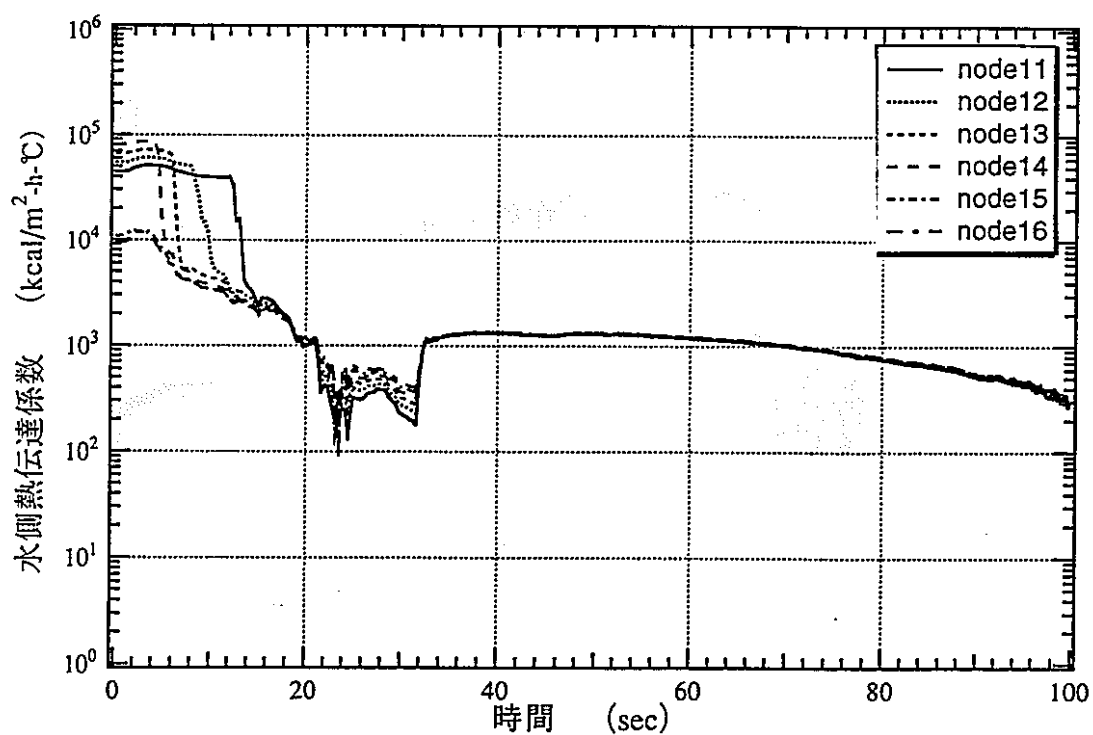


ケース 7r (BLOOPH) (EV 入口放出弁開時刻 10 sec 遅れ)

図2.4(7)-9 EV コイル下部熱伝達係数変化 (定格運転状態からのブロー)

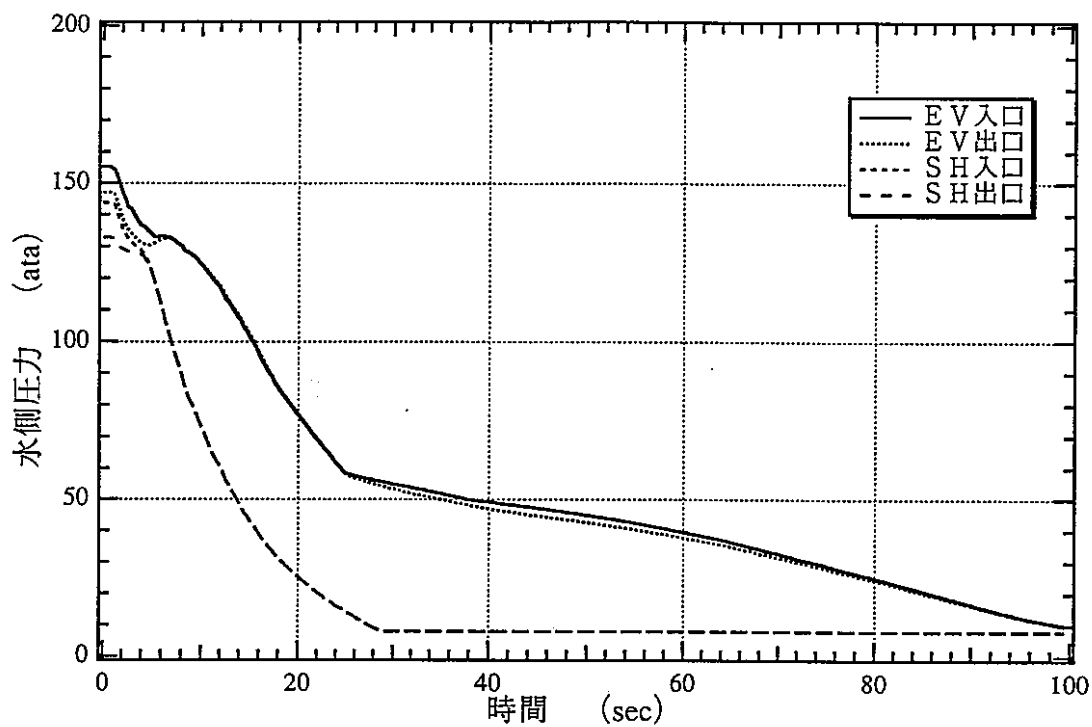


ケース 1 (BLOOPH)

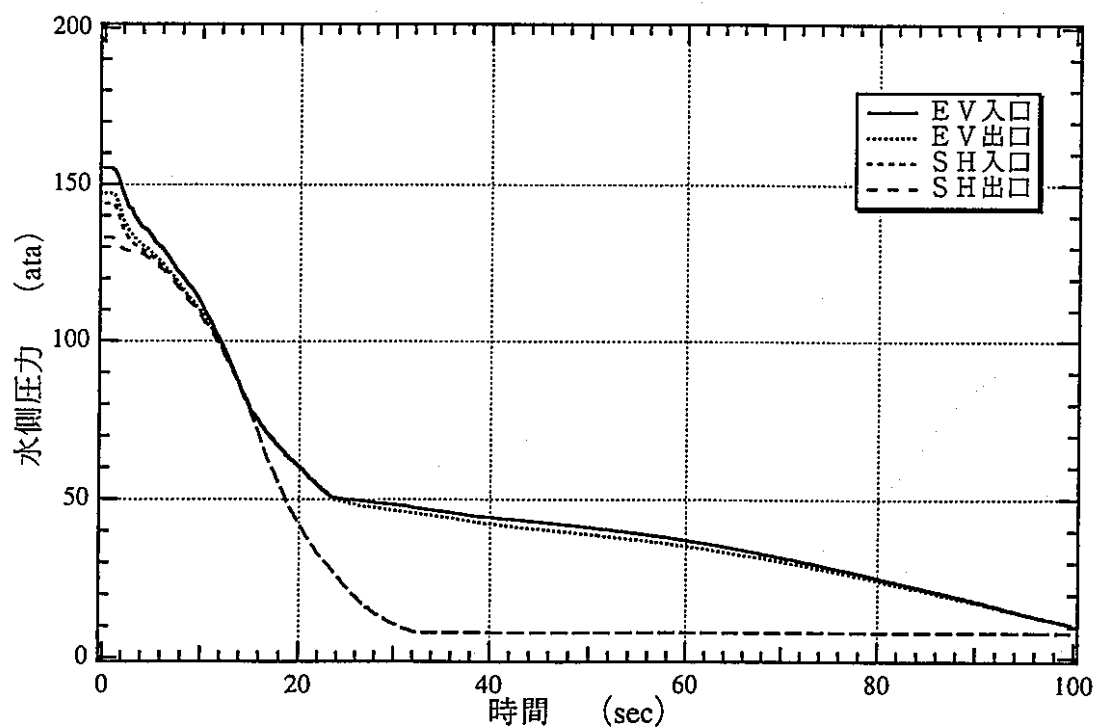


ケース 7 (BLOOPH) (EV 入口放出弁開時刻 10 sec 遅れ)

図2.4(7)-10 EV コイル下部熱伝達係数変化 (定格運転状態からのブロー)



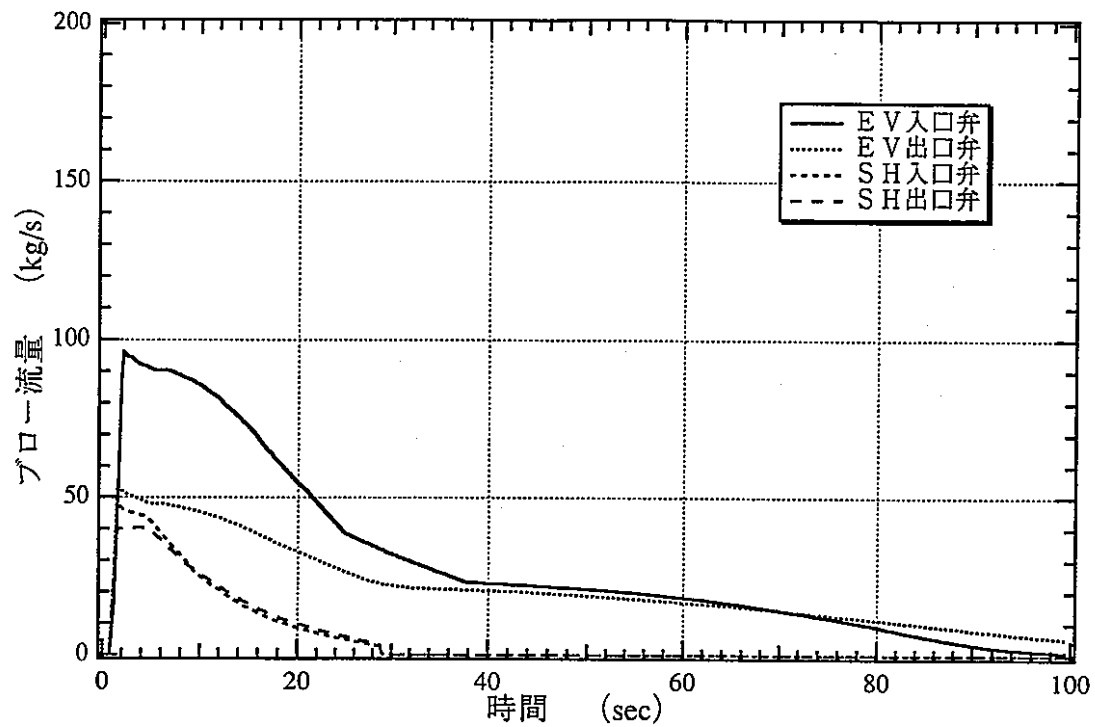
ケース 1 (BLOOPH)



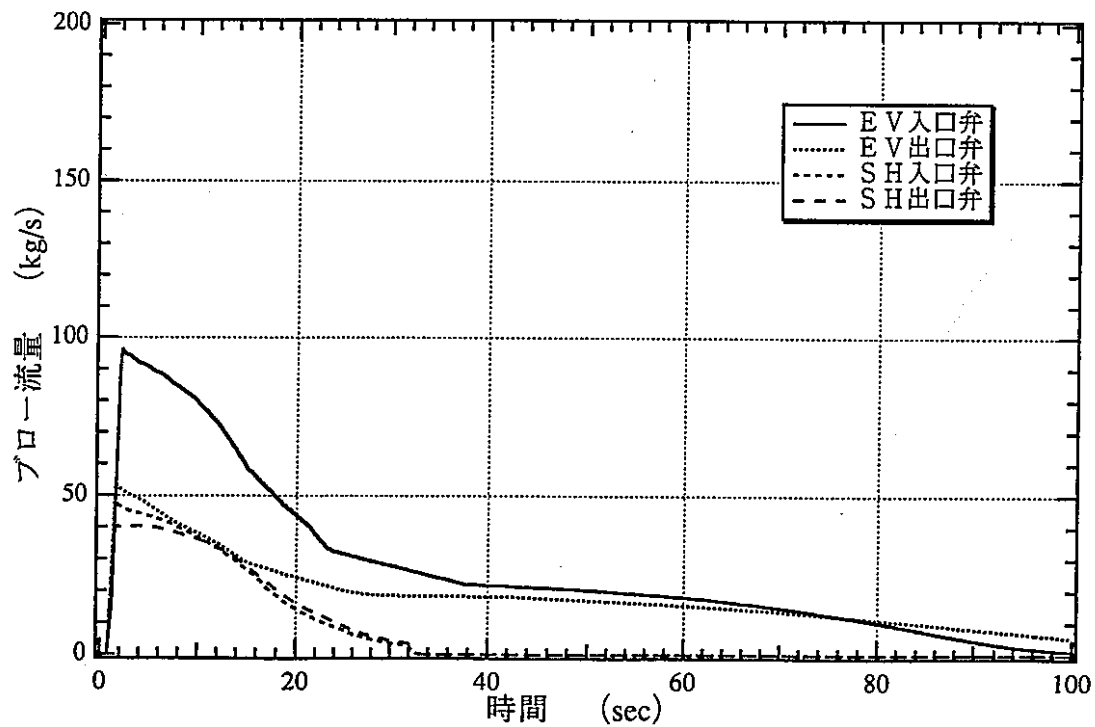
ケース 8 (BLOOPH) (SH 入口弁閉時刻 10 sec 遅れ)

図2.4(8)-1 SG 出入口圧力変化 (定格運転状態からのブロー)



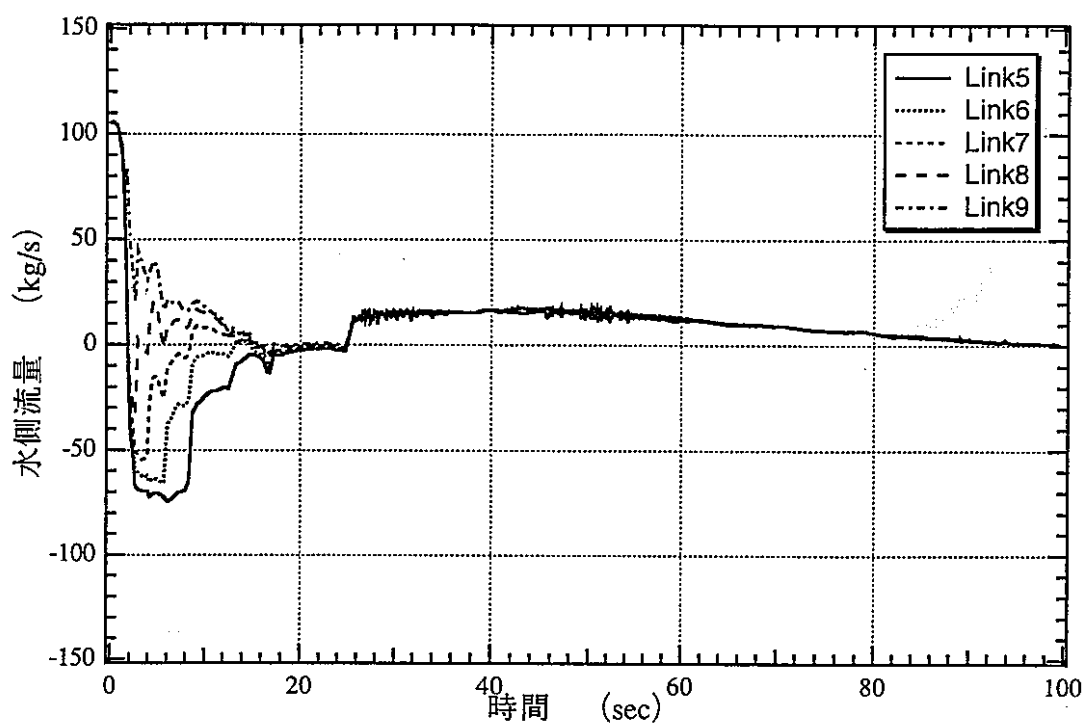


ケース 1 (BLOOPH)

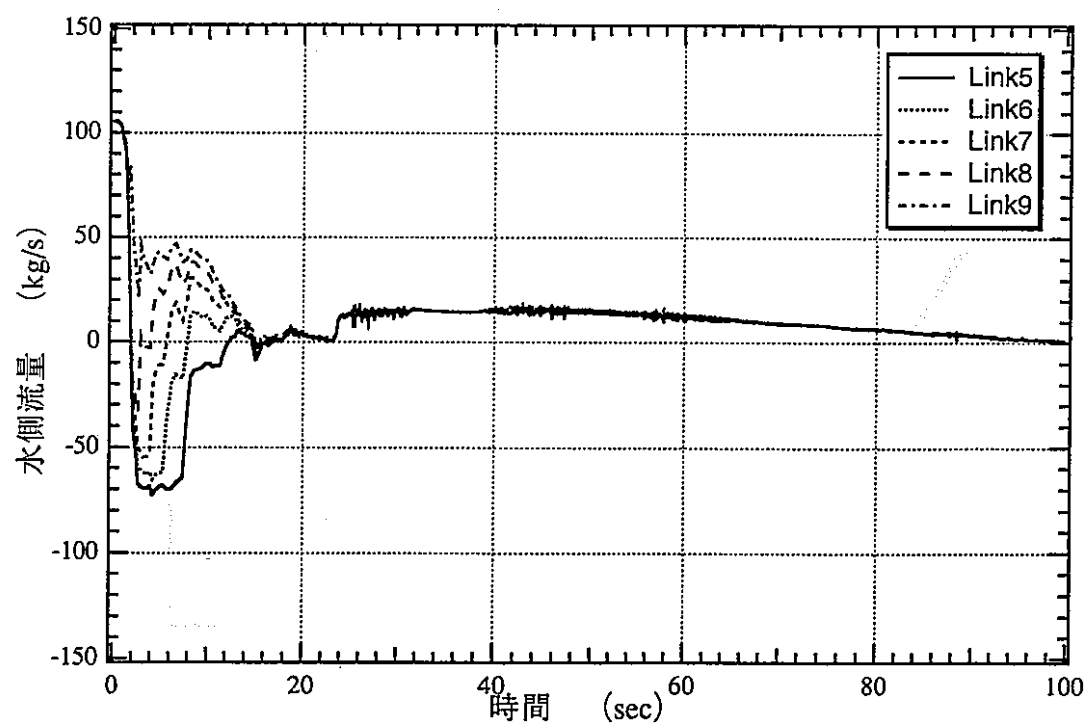


ケース 8 (BLOOPH) (SH 入口弁閉時刻 10 sec 遅れ)

図2.4(8)-2 SG 出入口放出弁流量 (定格運転状態からのブロー)

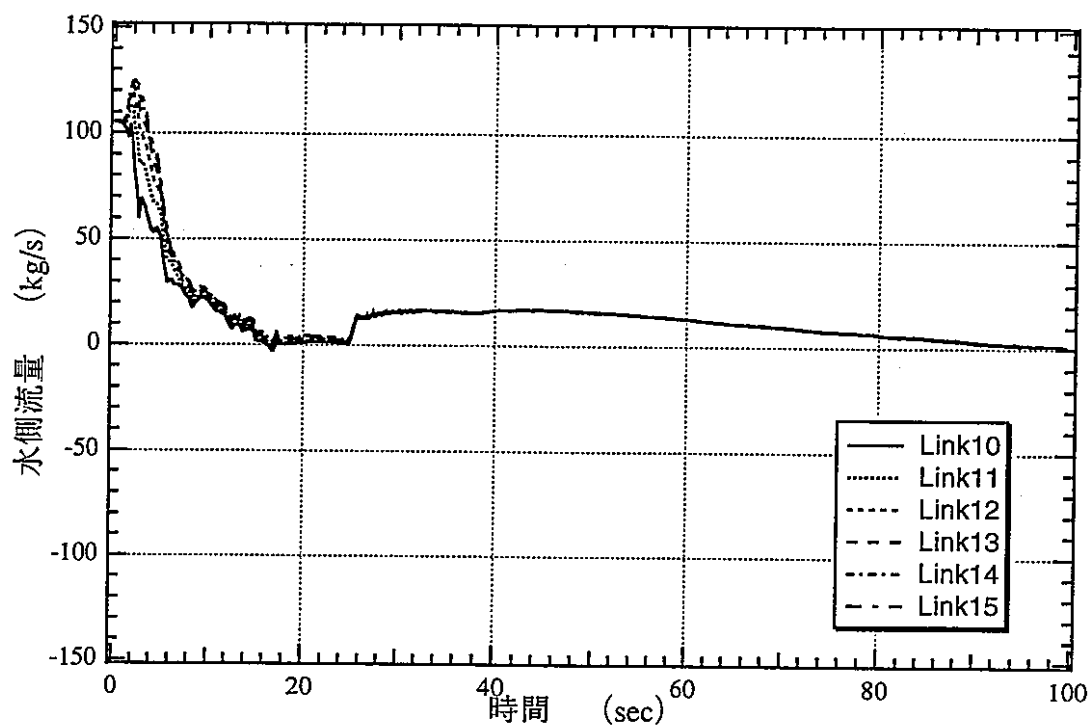


ケース 1 (BLOOPH)

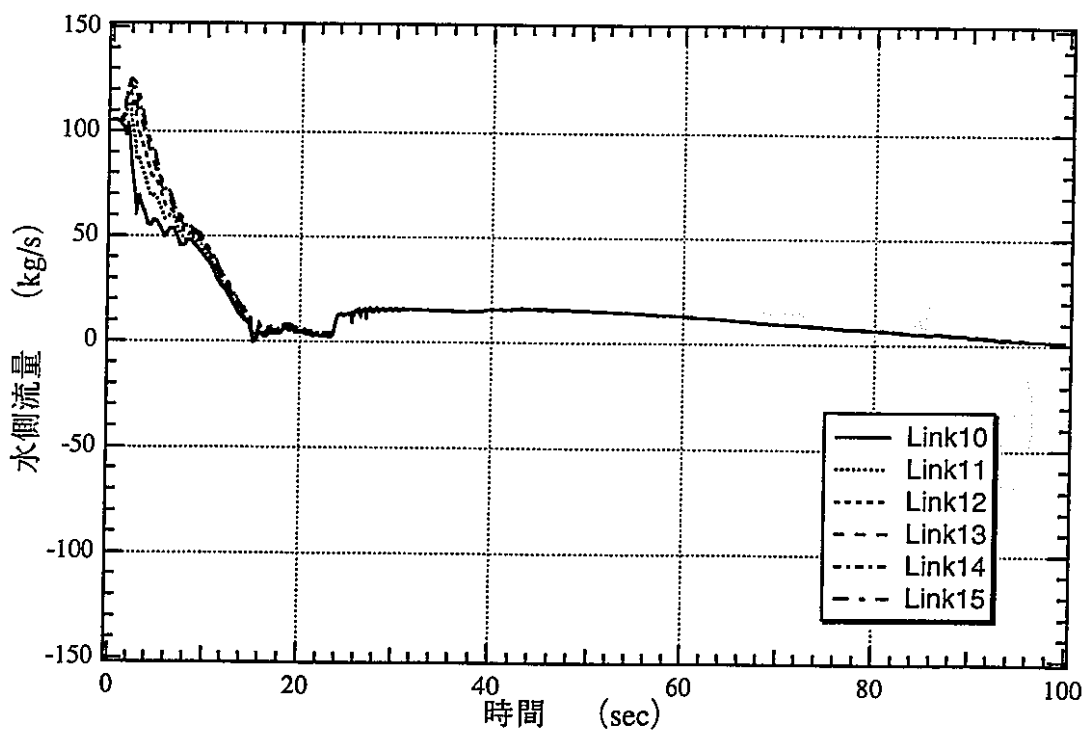


ケース 8 (BLOOPH) (SH 入口弁閉時刻 10 sec 遅れ)

図2.4(8)-3 EV コイル下部流量変化 (定格運転状態からのブロー)

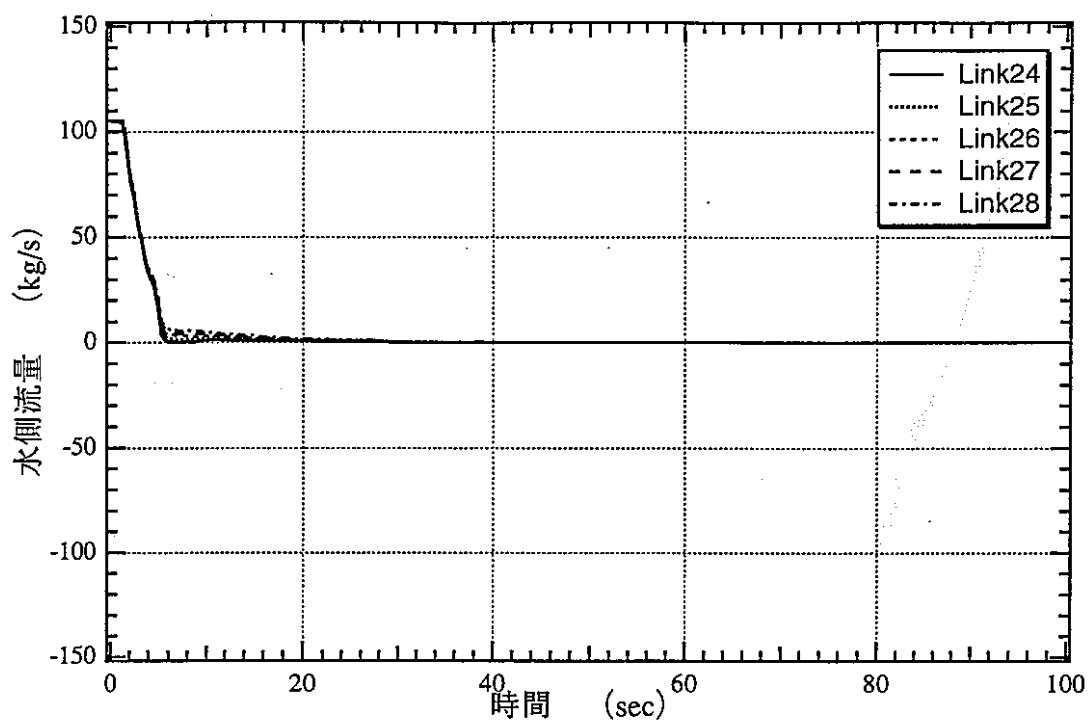


ケース 1 (BLOOPH)

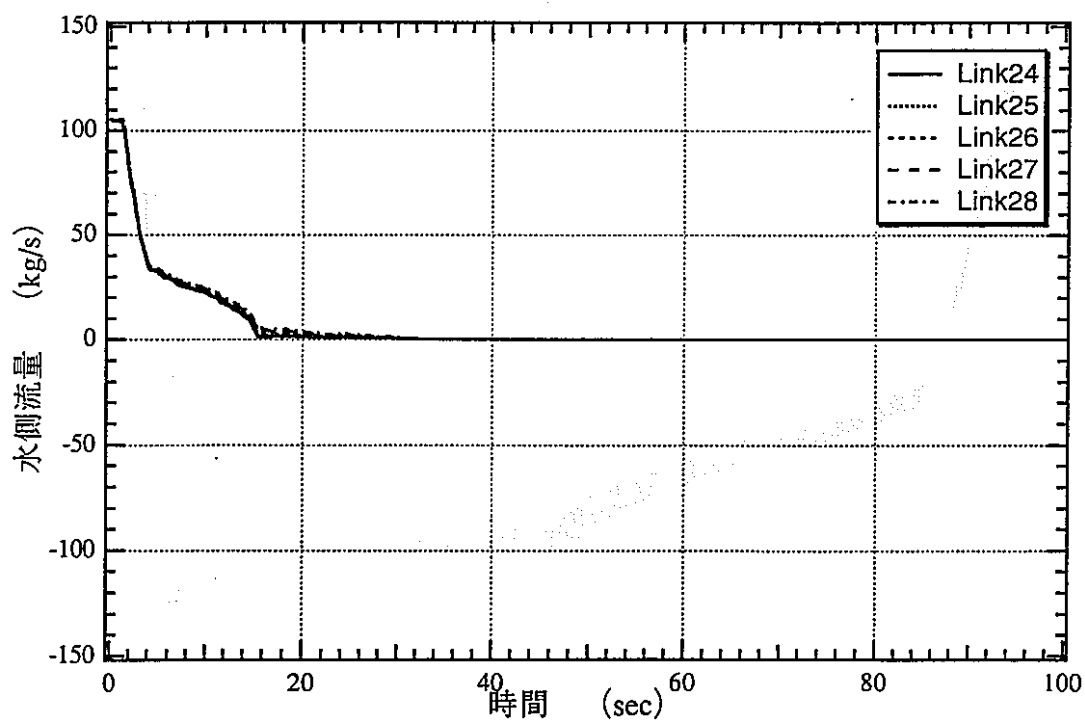


ケース 8 (BLOOPH) (SH 入口弁閉時刻 10 sec 遅れ)

図2.4(8)-4 EV 管束部上部流量変化 (定格運転状態からのブロー)

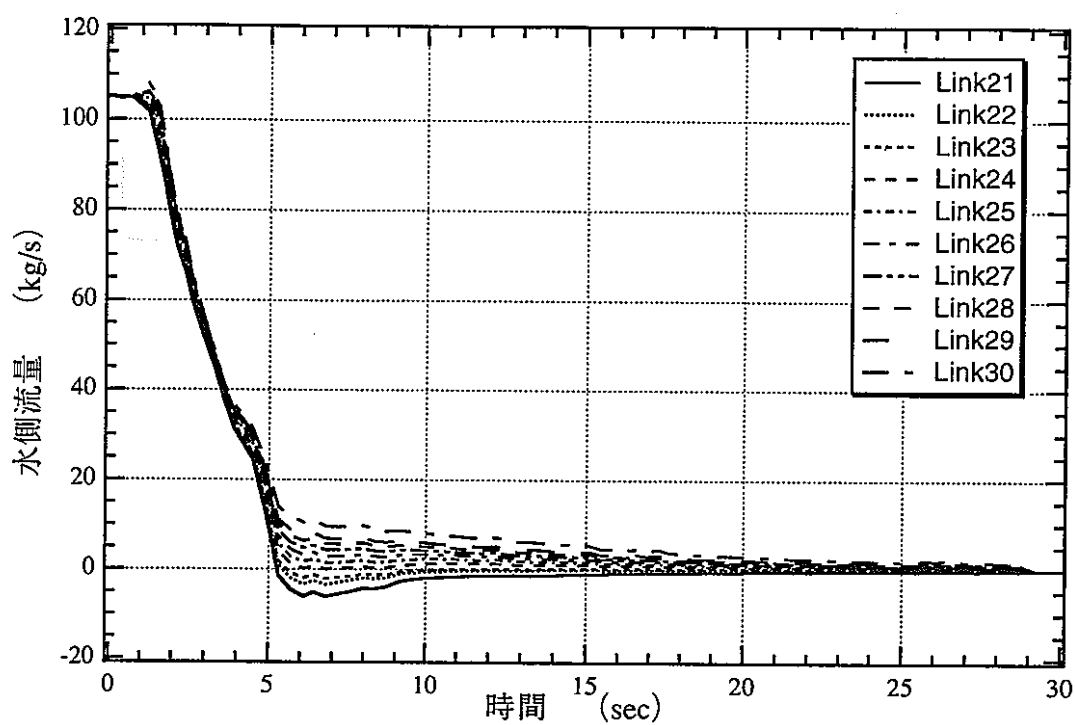


ケース 1 (BLOOPH)

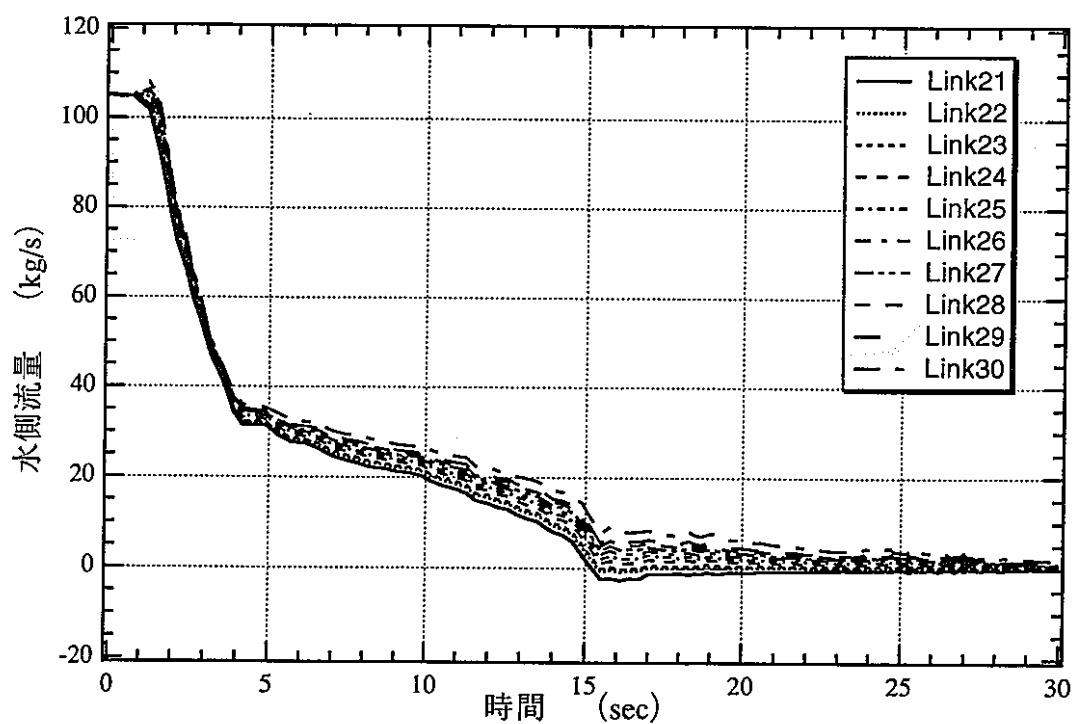


ケース 8 (BLOOPH) (SH 入口弁閉時刻 10 sec 遅れ)

図2.4(8)-5 SH コイル流量変化 (定格運転状態からのブロー)



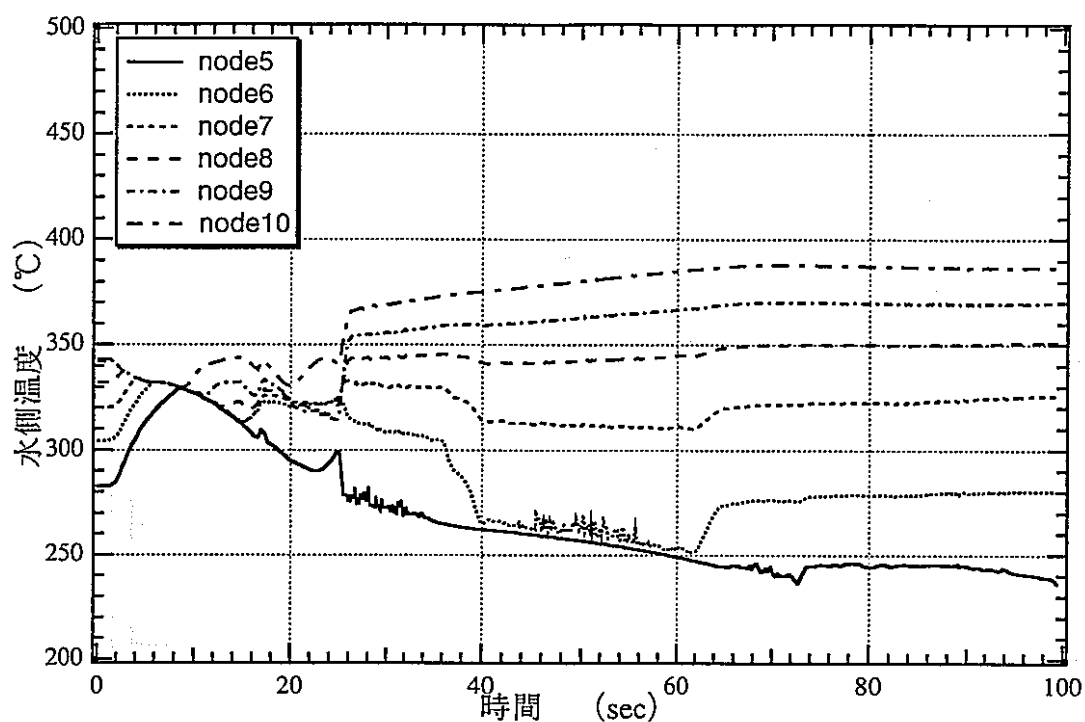
ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)



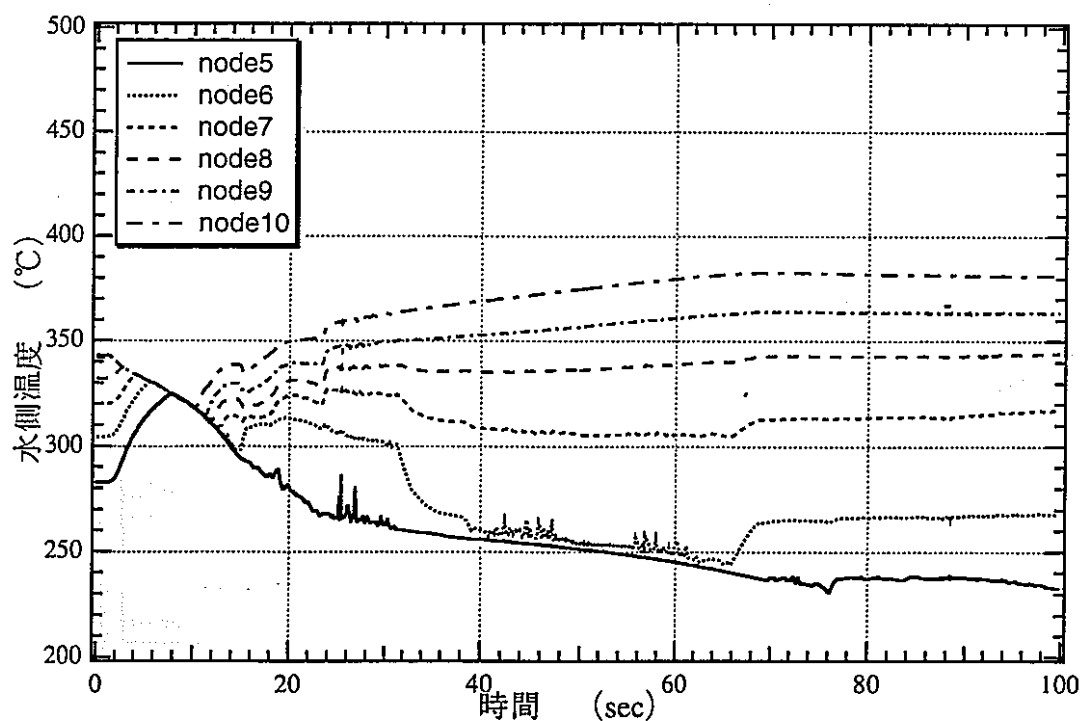
ケース8 (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

(SH 入口弁閉時刻 10 sec 遅れ)

図2.4(8)-6 SH コイル部流量変化 (定格運転状態からのブロー)

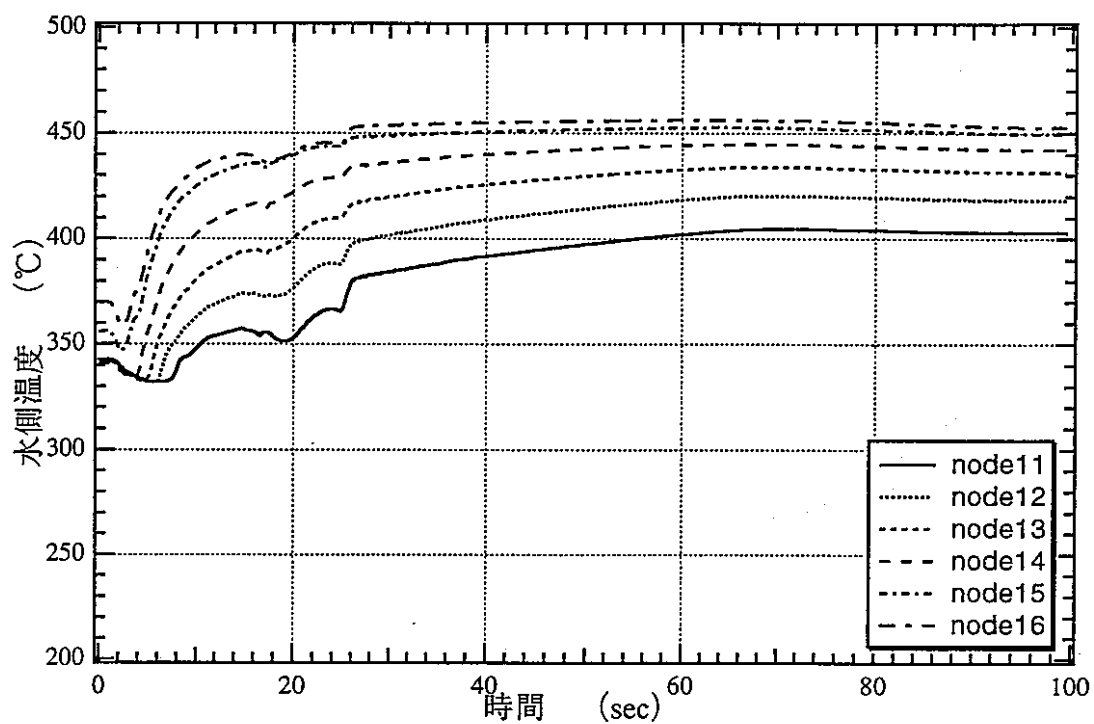


ケース 1 (BLOOPH)

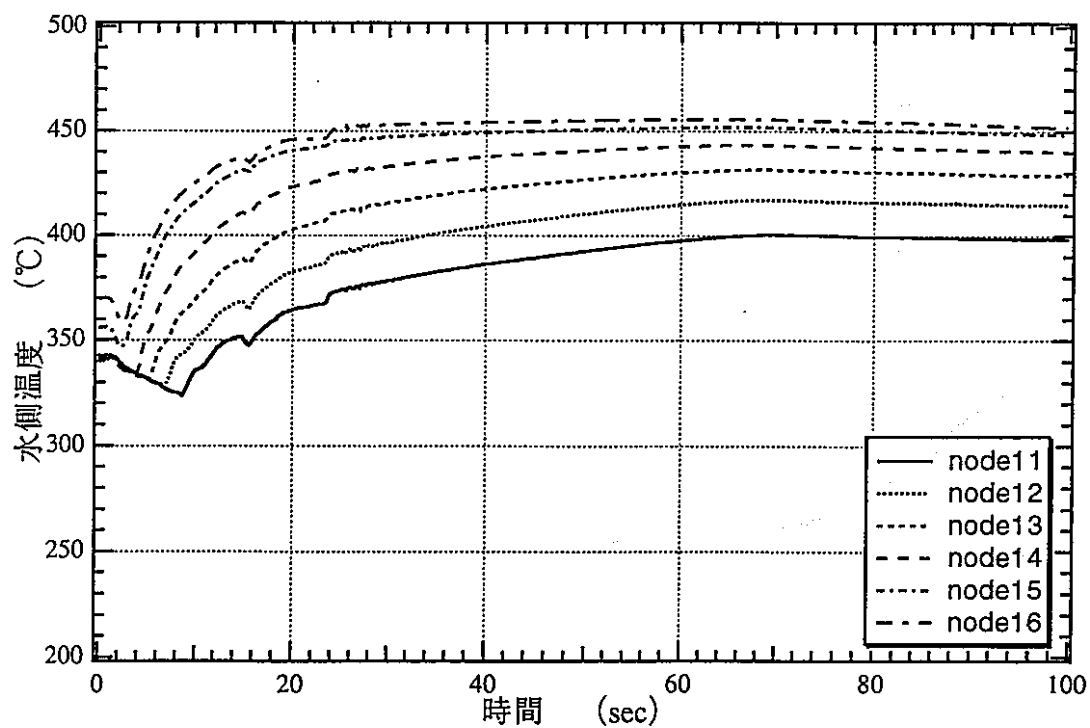


ケース 8 (BLOOPH) (SH 入口弁閉時刻 10 sec 遅れ)

図2.4(8)-7 EV コイル下部温度変化 (定格運転状態からのブロー)

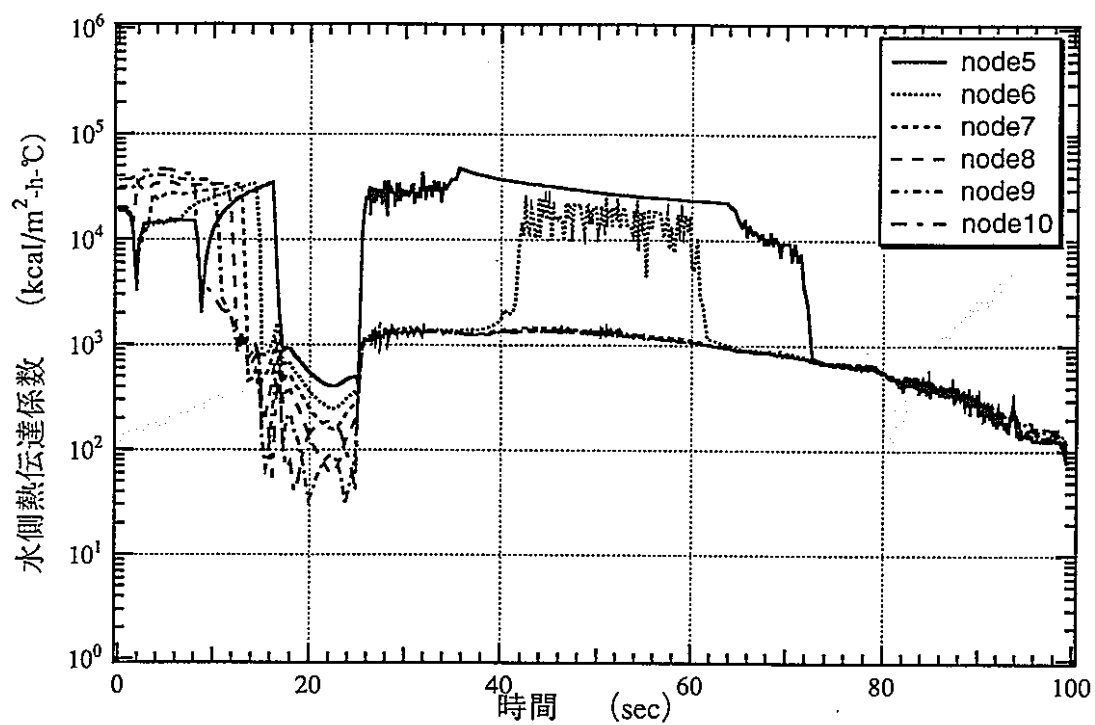


ケース 1 (BLOOPH)

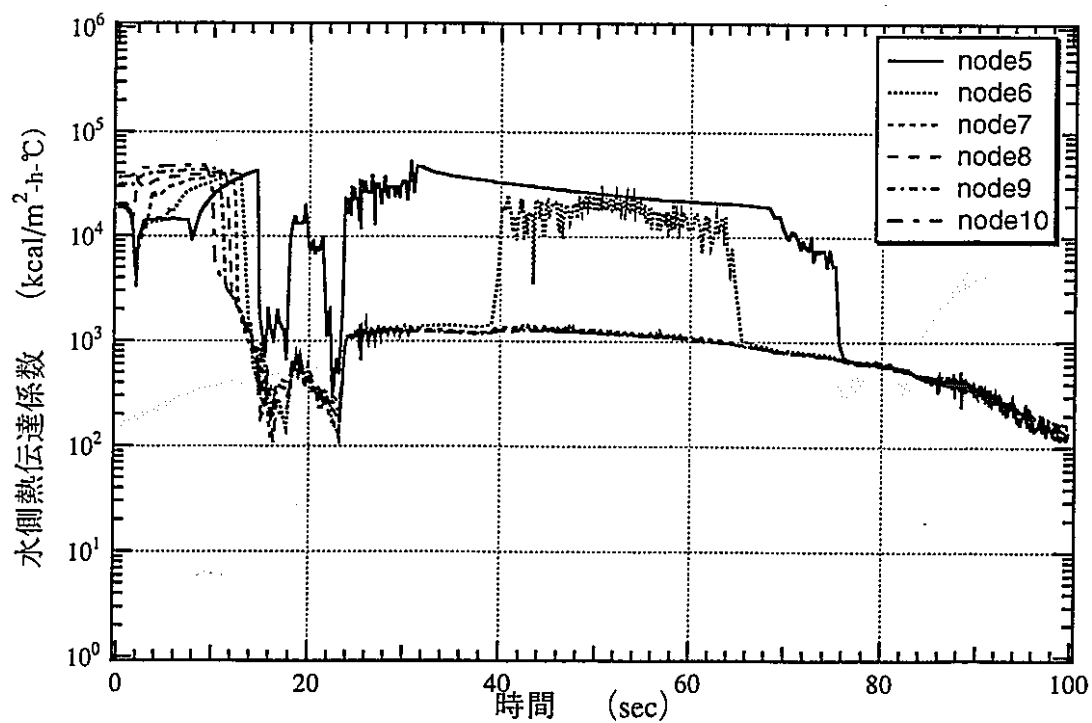


ケース 8 (BLOOPH) (SH 入口弁閉時刻 10 sec 遅れ)

図2.4(8)-8 EV コイル上部温度変化 (定格運転状態からのブロー)



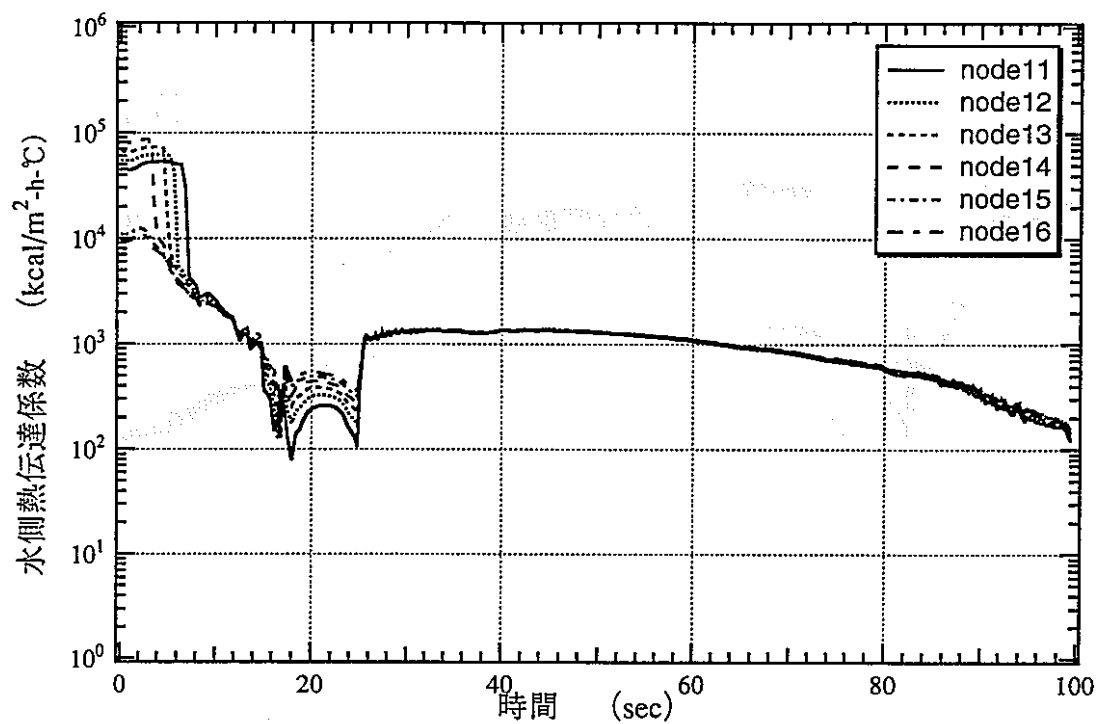
ケース 1 (BLOOPH)



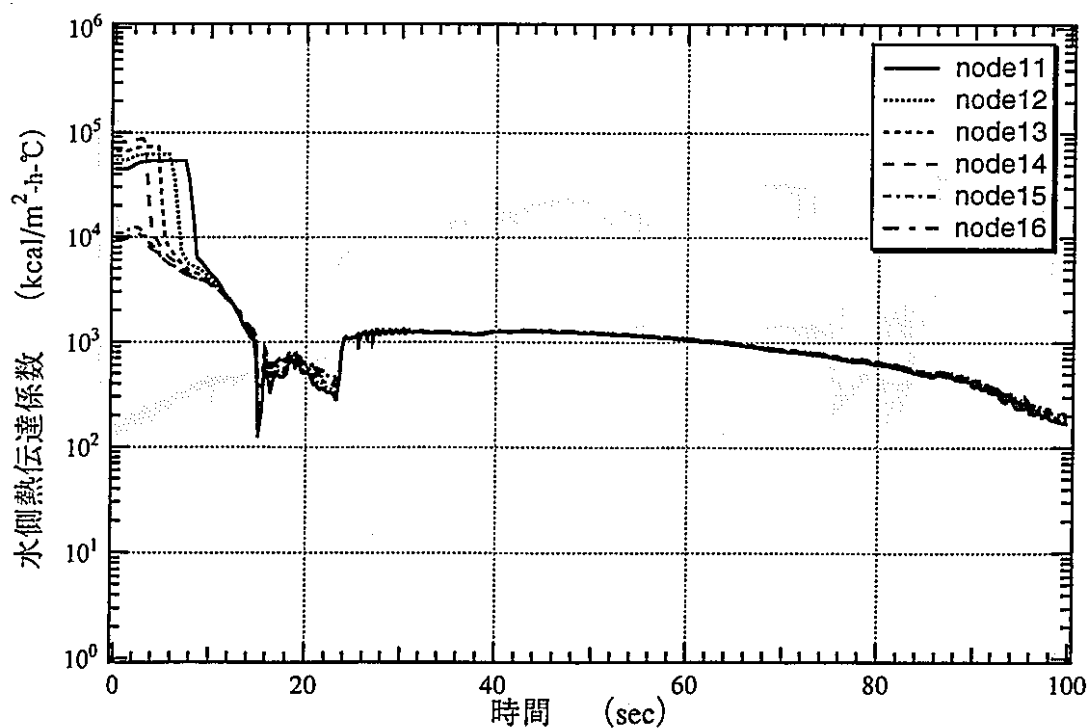
ケース 8 (BLOOPH) (SH 入口弁閉時刻 10 sec 遅れ)

図2.4(8)-9 EV コイル下部熱伝達係数変化 (定格運転状態からのブロー)





ケース 1 (BLOOPH)



ケース 8 (BLOOPH) (SH 入口弁閉時刻 10 sec 遅れ)

図2.4(8)-10 EV コイル下部熱伝達係数変化 (定格運転状態からのブロー)

## 2.5 検討

上記解析結果について、次の4点について検討・考察する。

- ・ ケース1（現状設備）のブロー挙動
- ・ 放出弁容量変更の影響
- ・ EV 入口放出弁開動作遅れの影響
- ・ SH 入口止弁（隔離弁）閉動作遅れの影響

### (1) 現状設備（ケース1）のブロー挙動

#### (a) 現状設備（ケース1）の解析結果（水側圧力、流動変化）

SG 水ブロー時水側圧力・流動挙動は次の通り。

解析条件より、水リーク信号発信から、1s 後に水ブロー、SG 隔離が開始する。ブロー開始後、EV 及び SH の入口放出弁及び出口放出弁は 1～2s で全開となり、ブロー流量は急激に増大し、ピークに達する。この時点でのブロー流量は、EV 入口で定格時給水流量とほぼ同じ、EV 出口及び SH 出、入口は定格時蒸気流量の約半分である。一方、EV 入口止弁、SH 入口止弁は 5s で全閉となる。特に、EV 入口側からの急速ブローによる減圧波の伝播に伴い、水側加圧水部は、EV 入口から、急速に逆流に転ずる。しかしながら二相部では減圧により沸騰が促進されるものの減圧波はそこで消滅し、逆流には至らない。そのため、初期二相部より下流側の過熱蒸気部では流量は急減するものの、正流を維持する。

#### (EV 内)

EV 出入口からのブローの効果により EV 内圧力は急減するが、これに伴い、伝熱管内沸騰部の位置は、初期加圧水状態の EV 伝熱管入口側から給水入口ヘッダ及び給水管へと移動する。この沸騰部は圧力源となるため、これの給水入口側への移動に伴い、これより下流側の、初期加圧水部で反転していた流動は、再び流れの方向を変え、順次正転する。ブロー開始から約 24 秒後以降、容積の比較的大きな（伝熱管部ノードの約 4 倍）給水入口ヘッダに沸騰部が移動するとその辺りの沸騰が挙動を支配する。また、EV 入口放出弁からの放出流体が単相から二相に変化することのも加わり圧力減少は比較的に緩慢となる。

EV 内圧力は、約 24s から比較的緩慢な降下となるが、ブロー開始後、

約100s 後には 10 ata 以下となる。

ここで、EV 出口流量のブロー開始直後の変化に注目する。EV 出口蒸気流量は、一時的に増大しているが、これはSH 入口止弁が水ブロー開始後 5s で閉止、EV 出口放出弁が 0.3s で全開となり、一時的に EV 出口流量が通常運転時 (105.3 kg/s) より大きくなるためである。

一方、EV 出口圧力は、流量とは逆に急減しており、これらは相互に妥当な変化を示していると考えられる。

(SH 内)

SH では、水側容積（及び初期インベントリ）は EV に比べて小さいにもかかわらず、SH 出入放出弁からの放出容量はそれぞれ EV 出口放出弁と同程度と比較的大きいため、圧力は EV よりも早く降下し、ブロー開始後約 30s 程度で 10 ata 以下となる。一方、伝熱管内流量は SH 入口弁が全閉となる約 5s まで急激に減少し、それ以降は SH 出入口の放出弁流量が支配するところとなる。SH 入口、出口の放出弁容量は、ほぼ同じになるため、約 5s 以降 SH 入口側では逆流し、一方、SH 出口側で正流を維持する。これらの中間部には、流量がほぼ 0 となる部分が存在する。

また、ブロー開始直後に着目すると、ブロー開始約 5s までは、SH 入口弁を通した EV 側からの蒸気流入により、圧力はほとんど減少しない。

(水側温度変化)

(i) EV 入口側加圧水部各ノードでは、逆流に伴う温度の高い出口側流体の流入により温度が上昇する。このため各ノードの温度は系全体の圧力降下と相まって順次飽和点に達し、沸騰を開始する。その後は圧力の低下に従い、飽和温度も低下するため各ノードの温度はほぼ同一の値となり一様に減少する。その後流体エンタルピの高い管束中部のノードから蒸気単相となり始め、Na 側からの入熱により再び温度は上昇する。

沸騰開始及び蒸気単相への変化時期は、初期の流体エンタルピの大きな管束中部が早く、徐々に管束下部（EV 入口側）に移る。

尚、伝熱管内初期水／蒸気相状態はは次の通りである。

|                  |          |
|------------------|----------|
| ノード 3、4 (ダウンカマ部) | : 水単相    |
| ノード 5 ~ 8        | : 水単相    |
| ノード 9 ~ 14       | : 水/蒸気二相 |
| ノード 15、16        | : 蒸気単相   |

(ii) 一方、EV 出口に近い初期蒸気部分では、ブロー開始直後に断熱的膨張で数秒間約 10℃低下するものの、その後は、Na 側からの入熱により、温度は上昇する。水側流量は、正流が継続するものの、ブロー開始前（定格運転時）よりは小さくなるのでブロー前よりも高い温度になる。

(水側熱伝達係数)

BLOOPH コードでは、水側熱伝達率は、水単相、二相（沸騰領域）、蒸気単相の各状態に対する相関式で模擬されている。（添付資料 A 参照）伝熱管各部の各時刻における熱伝達率は、これら 3 種類のいずれかの状態に依存したものとなっている。

代表的な例として、初期加圧水状態の管束下部（ノード 5）では、次の変化をする。

|                     |                       |
|---------------------|-----------------------|
| 0 sec ~ 約 9 sec     | ..... 水単相             |
| 約 9 sec ~ 約 18 sec  | ..... 二相              |
| 約 18 sec ~ 約 26 sec | ..... 蒸気及び二相の振動と考えられる |
| 約 26 sec ~ 約 72 sec | ..... 二相              |
| 約 72 sec ~          | ..... 蒸気単相            |

また、初期二相の管束中部（ノード 11）では、次の変化をする。

|                     |                       |
|---------------------|-----------------------|
| 0 sec ~ 約 6 sec     | ..... 二相              |
| 約 6 sec ~ 約 18 sec  | ..... 蒸気及び二相の振動と考えられる |
| 約 18 sec ~ 約 26 sec | ..... 蒸気単相と考えられる      |
| 約 26 sec ~          | ..... 蒸気単相            |

## (2) 放出弁容量変更の影響

添付資料 D に 2.2 節 ~ 2.4 節で述べたケース 1 ~ ケース 4 に相当する放出弁条件での（SH 入口止弁の閉止が速いことが異なるのでケース 1' ~ ケース 4' と称する）SG 出入口圧力、EV 管束上部及び下部の流動変化を比較して示

す。また、ケース 1'、2'、3' の給水配管、給水ヘッド、ダウンカマ部を含む EV 入口側伝熱管内、ボイド率変化、水側流量変化、伝熱管温度変化の図を示す。

上述した通り、これらは SH 入口止弁の閉止特性がやや異なるものの放出弁容量変更の影響はほとんど変わらない。従って、これら解析結果により考察する。

図D-2に見られる通り、ケース 1'（現状ブロー設備）で約 20 sec 近傍で約 10 sec 間続く極低流量域がケース 2'、3' で出口放出弁容量を大きくすることによりほとんどなくなっている。しかし、出口放出弁だけでなく、入口放出弁も大きく（3B → 4B）すると、ケース 4' に見られる通り、再び極低流量域が 5 ～ 6 sec 間発生している。

この原因を探るため、先ずケース 1'で極低流量域が発生するメカニズムについて考察し、次にこれが放出弁容量を変えた場合にどう変化するかについて考える。

ケース 1'（又は 1）のブロー途中における圧力、流動変化の全般的挙動は前項で述べた通りである。伝熱管内初期加圧水部は、ブロー後逆流に転じ、圧力降下に伴い沸騰を開始すると流量は極く少なくなり、やがて正流に転ずる。逆流から正流に向かう流量変化（流量増大）がステップ状になっているのは、解析モデル上、ノードが有限の体積を持っていることに起因すると考えられる。すなわち、沸騰を開始する位置が時間的に不連続に変化するために生じるもので実際の流量増大はステップ状ではなく連続的になると予想される。

このようにして、沸騰開始点は順次 EV 入口側に移動してくるが、沸点がダウンカマ部に達するとそれまでの変化傾向とは異なる様相を示す。図D-4 の EV 入口に近い各部のボイド率変化を合わせて見ると、ダウンカマ部（EV 入口寄り）が沸騰を開始すると、伝熱管全長にわたって一様に、流量が一時的に急減し、その後再び復帰して、流量が 0 近傍となることが判る。また、この流量急減・復帰後、極低流量域が約 10 sec 継続した後、沸騰点が給水ヘッド部に移動すると、ダウンカマを含めた伝熱管全ての部位において、流体は明確に正流に転じ以降圧力降下に伴い、正流を保ちながら、流量は徐々に一様に減少する。このように流動パターンの大きな変化が、EV 入口寄りのダウンカマ部（DC 部）

が沸騰開始する時点、及び給水ヘッドが沸騰を開始する時点でみられる。この変化のメカニズムは次のように推定される。

DC 部の通常運転中の水温度は約 250 °C 程度と低く、ブロー開始後も逆流により、数十度温度が上昇するものの、管束部よりはかなり低い（約 50 °C 低い）。このため、DC 部で沸騰が開始すると、DC 部の低温の水の高温の管束部への流出入に伴う急激な相変化が生じ、これにより、数値解析上、圧力、流量振動が生じる。この大きな変化は、管全長の流動に影響を及ぼし、管内ほぼ同一の流量変化になると考えられる。この振動にも係わらず、時間的に平均した流量は DC 部から入口放出弁側への流量（入口放出弁流量と言うよりむしろ D/C 部から給水ヘッドへの流量）と出口放出弁からの流量のバランスできまる。

この振動は、数値計算上の結果である（実際の伝熱管内水／蒸気エンタルピ等の諸量は空間的にも、時間的にも連続であるのに対し、数値計算上は、ノード分割をし、且つ、時間的にも有限差分を採っていることにより、実際よりも振動が発生し易くなると考えられる）が、メカニズムとしては十分考えられるものであり、程度の差こそあれ、実際にも生じる可能性がある。この場合は、平均流量によるものよりも大きな熱伝達が期待される。今後、試験により確認すべき事項である。

ケース 1'（又は 1）の場合、両者は方向が反対でほぼ同程度の流量なため、（図 D-5 のリンク 2 の流量と図 2.4(1)-2 の EV 出口放出弁流量を比較参照のこと）平均的には、0 近傍の流量になったもの推定される。

圧力が更に低下し、給水入口ヘッド部が沸騰し始めると、給水入口ヘッド部の容積が大きい（伝熱管部ノードの約 4 倍）ため、基本的には、ここが流出源となり、伝熱管全領域の流体を出口放出弁を通して流出させるようになり、伝熱管全領域にわたって流れる方向は正流となる。また、給水入口ヘッド部の流体の温度は D/C 部のそれより更に低いため、低温水の高温伝熱管部への流入により、急激な相変化が生じ、上記と同様な振動が生じるが、平均した流れの方向は正流となる。

以上がケース 1（又は 1'）の極低流量域発生メカニズムの推定である。

ケース 2'（EV 出口放出弁 6B）、3'（EV 出口放出弁 8B）では、この極低流量域の流量が 0 ではなくそれぞれ約 10 kg/s、約 20 kg/s となっており、高温ラ

プチャ防止上好ましい結果となっている。これはD/C部沸騰開始から、給水入口ヘッダ部沸騰開始までの間の平均流量が、EV出口放出弁容量の増大に伴い、正流側にシフトしたためと考えられる。また、ケース4では入口放出弁（3B→4B）、出口放出弁（4B→6B）共大きくなったため、両者のバランスからケース1と同様0近傍となったものと考えられる。

従って、EV出口放出弁流量をEV入口放出弁流量に比べて大きくすることが、ブロー時伝熱管内流量を確保するために有効であり、出口放出弁流量／入口放出弁流量比が大きいほど効果は大きいと言える。しかしながら、入口放出弁流量を小さくすると、ブロー後初期の逆流時の流量が小さくなり、管内冷却効果を減少させることになるため、制限なくこれを小さくすることは出来ない。

先ず、ブロー後初期の逆流流量が、高温ラプチャ防止上必要な流量以上となるようにEV入口放出弁容量を決め、次いで上記バランスを考慮して、EV出口放出弁容量を決めるという手順で、放出弁容量の最適化が画れるものとする。

（但し、ウェステージによる破損伝播抑制のためにはブロー時間も重要なチェック項目となるので注意が必要。）

関連して、図D-1に見られる通り、EV内圧力変化の変曲点での圧力が入口放出弁容量が同じであれば、出口放出弁容量が大きいほど小さくなるが、これは、ブロー開始後初期の逆流による給水入口ヘッダ部への逆流流量（積分値）が出口放出弁容量が大きいほど小さくなり、そのため、給水入口ヘッダ部の沸騰開始圧力（飽和圧力）が小さくなるからであると考えられる。

### (3) EV入口放出弁開動作遅れの影響

図2.4(7)-3、4に見られる通り、EV管束上部の流量変化には大きな影響は見られないものの、管束下部のうち、特にリンク5、6では、入口放出弁が閉止している間（～10s）、流動が停止しているのが見られる。

これは、ブローによる圧力低下によって、沸騰開始点（流出源）が初期加圧水部でも、上方のエンタルピの大きい方から、下方のエンタルピの小さい方へ移動してくるが、その間初期加圧水部の流動は停止するからである。10sで入口放出弁が開き始めると、それまで停止していた部分は逆流し始め、その後はケース1と同じような変化となる。

従って、伝熱管内流動確保の目的のためには、EV入口放出弁の開時刻を遅

らせることは効果はなく、逆に、管束下部の流動を停止させることから、悪影響を及ぼすことになる。

#### (4) SH 入口止弁（隔離弁）閉動作遅れの影響

SH 入口止弁の閉動作開始時刻を現状より 10s 遅らせた図2.4 (8)-1～6の結果より、高温ラプチャ評価上、次の効果（影響）があることが判る。

- ① 初期～10s までのEV 内圧力降下が速まる。逆にSH 内圧力降下は遅くなる。
- ② 初期～10s までのSH 伝熱管内流動が確保できる。

これは、現状設備では、各 SG (EV、SH) 内水／蒸気インベントリに対する放出弁流量がSH 側の方が、EV 側よりも大きく、圧力は速く降下するため、SH 入口止弁を開けておくことは、EV にとって、新たな放出流路が確保されることになり、EV 出口放出弁容量を大きくしたと同じ効果をもたらすからである。

逆にSH 側の圧力降下が遅くなるため、高温ラプチャ評価上 SH 伝熱管の方は厳しくなるので、実際に評価して判断する必要があるが、SH の伝熱管材が高温強度のより大きい SUS 材であることを考えると、弁の閉動作開始時刻を遅らすと言うこの方法は設備（物）の変更を伴わないだけに魅力的な方策である。

但し、40% 出力運転時には タービン発電機併入、解列を行う場合もあり、この場合には、SH バイパス運転（SH 入口弁が閉止されている）となるので注意を要する。

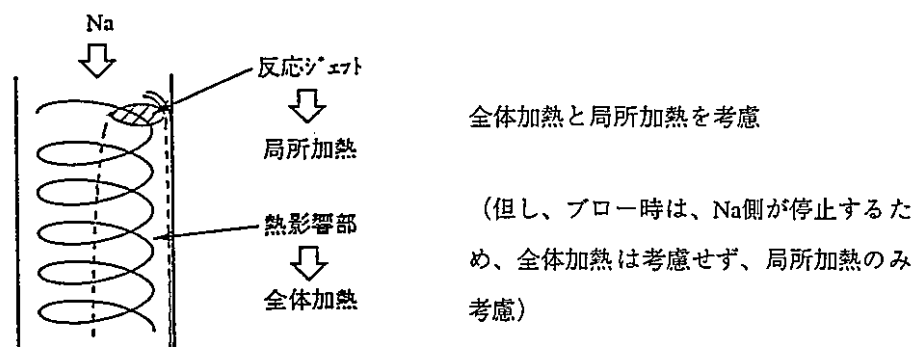


### 3. 反応熱を考慮した水側状態量の補正

#### 3.1 補正の考え方

第2章で記載した“BLOOPH”による水ブロー解析では、伝熱管からの水リークによって生じるNa-水反応の影響については考慮していない。しかし、高温ラプチャが問題となる数kg/sの中～大リーク規模のNa-水反応が生じた場合かなりの量のNa-水反応熱が生じ、これが伝熱管内の水／蒸気に入熱となって加わり、水側温度を上昇させる可能性がある。従って、高温ラプチャ評価上このNa-水反応熱による水側への入熱を考慮する必要がある。

ここでは、Na-水反応による加熱を2つに区分して、考慮することとした。1つは、反応部局所加熱である。これは数kg/s程度のリークの場合、高温反応域は、数10cmの拡がりを持つことが観察されているが、これによる加熱である。もう1つは、全体加熱である。これは、Na-水反応による熱が主にSG管束部セクタ内Naに吸収され、全体Naの温度上昇となり、これがSG水側全体の温度上昇をもたらす。（下図参照）



但し、ブロー時は、Na側が停止するため、水ブロー解析結果を補正する際には全体加熱は考慮せず、局所加熱のみ考慮することとした。

### 3.2 補正の方法

前 3.1 節で述べた通り、ブロー開始以前では全体加熱及び局所加熱を考慮し、またブロー開始後は局所加熱を考慮した補正を行う。全体加熱は、Na と水によって発生する熱 (2 kg/s のリークの場合 2,486 kcal/s)<sup>3)</sup> が全て SG 水側に吸収されるものとして、また、局所加熱は伝熱管の軸方向 1 次元熱伝達計算により、補正を行う。水ブロー途中の熱伝達計算について、作業の初めの段階では、定常計算モデルを適用していたが、途中の段階で、定常計算では極低流量域において過度に保守的となることが判ったため、以降、過渡計算モデルを適用することとした。

ここでは、両者の方法について記載する。尚、計算コードは RUPIN と呼ぶこととする。

#### 3.2.1 定常計算モデル

主な仮定と計算モデルを以下に示す。

(i) 反応域からの局所加熱により、水／蒸気側状態量が変化し、その結果、流量等も変化することが考えられるが、局所加熱領域長さは最大でも  $\sim 1$  m 程度であり、伝熱管長さは約 66 m と長いため、局所加熱が圧力、流量に及ぼす影響は小さいと考え、これを無視する。(水／蒸気流量は一定とし、状態変化に伴う、熱伝達率の変化は考慮する。)

(ii) 計算体系とメッシュ分割の概念を図 3.2-1 に示す。

上述の通り、水／蒸気側圧力、流量は計算体系内で一定とする。

(iii) 各メッシュ内では、エネルギーバランス式を解く。(図 3.2-2 参照)

この際、Na 側 (含む反応域) の温度、熱伝達率は入力とする。また、水側熱伝達率については SG 設計用相関式を用いることとする。(表 3.2-1 参照) 但し、ブロー途中には前述した通り極低流量域が発生するが、この極低流量域では上記 SG 設計用相関式は熱伝達率を過大評価する可能性がある。このため、この極低流量域にも適用できるものとして、二相流に対しては軽水炉の LOCA 評価で用いられている相関式を適用した計算も行う。(適用した熱伝達率相関図を図 3.2-3 に、相関式を添付資料 E に示す。)

(iv) 上述した計算式により、上流側境界より、下流側に逐次  $Q_n$ 、 $\Delta H_{wn}$ 、 $H_{wn}$ 、 $T_{wn}$ 、 $h_{wn}$  を求め計算を進める。

### 3.2.2 過渡計算モデル

3.2.1 項では、SGブローダウン時のNa-水反応入熱を考慮した伝熱管温度を、定常モデルを適用して補正計算したが、定常モデルでは、出／入口からの双方向ブローにより伝熱管内流れに停滞が生じた場合、伝熱管温度は非常に保守的な<sup>注1)</sup>高温値で評価することとなる。このため、伝熱管温度の計算精度向上を目指し、以下の過渡計算モデルに改良した。

また、Na-水反応時のNa側は約1000℃の高温領域で、 $10^6 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  オーダの高熱流束となることから、水側熱伝達率計算式は軽水炉のLOCA時適用伝熱式に加え、バーンアウト熱流束評価式を新たに組み込んだ。

注1) 定常モデルにおける温度計算の問題点

例えば、最小流量  $W=0.1\text{kg/s}$  ( $0.1\sim 1.\text{kg/s}$ が多い) を考える。

保守的に70ataの飽和蒸気とする。(流速を大きめに評価する。)

$$v=0.028\text{m}^3/\text{kg}$$

$$A=\pi/4\cdot(0.0242)^2\times 140=0.0644\text{m}^2$$

$$v=W\cdot v/A=0.1\times 0.028/0.0644=4.4\times 10^{-3}$$

$$L=0.5\text{m} \rightarrow 11.5 \text{ sec}$$

$$L=1.3\text{m} \rightarrow 29.9 \text{ sec}$$

0.1kg/sの場合、11.5 sec、あるいは、29.9 secの通過時間相当の応答遅れがあるはずであるが、定常モデルでは出口温度が瞬時に変化することになる。また、伝熱管の温度応答遅れも考慮できないため、流量の急激な変化に対し、熱伝達率が大きく変動すると伝熱管温度変化も急激に変化し、保守的に厳しく評価することになる。

#### (a) 計算モデル

計算モデルとメッシュ分割概念を図3.2-4 に示す。

##### <初期定常計算>

反応加熱による伝熱管温度の応答遅れを考慮して、プログラム内で、始めに30秒程度タイムマーチング方式の定常計算を行う。

Na側温度(1000～1200℃)、表面熱伝達率(6000～8600kcal/m<sup>2</sup>h℃)を一定、一

様として、水側はBLOOPHの定常計算結果の評価ポイントの圧力、エンタルピー、流量を一定として定常を取る。初期は定常の旋回流の効果を考慮し、伝熱式は設計式とする。

#### <過渡計算>

Na側は初期定常計算と同じ条件。水側はBLOOPHブローダウン解析結果を境界条件とする。伝熱式は設計式、並びに軽水炉のLOCA式の2種類を考慮する。具体的には次の通り。

- ・熱流動計算は逆流しても常に正流と扱うが、適用伝熱式は流れの向き（上昇流／下降流）を考慮する。
- ・水側熱伝達率計算式は設計式ベース、並びに、軽水炉のLOCA式ベースで考慮する。
- ・熱伝達率計算時、ドライアウト後のリウエットの条件はサブクール水の流入時とする。

#### (b) 管側熱流動モデルの改良（過渡モデル）

管側は水・蒸気流れで、圧縮性の1次元モデルで扱い、管側は入口のエンタルピー／流量／圧力変化を境界条件として入力し、過渡計算する。急速ブローダウンによる急激な圧力、流動状態の変化に対しての数値計算上の安定性を考慮して、解法は水・蒸気側質量保存式とエネルギー式を陰解差分式で展開して上流側から流れ方向に順次解く方法とした。

##### (i) 基礎式

連続の式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial W}{\partial Z} = 0 \quad (3.2-1)$$

エネルギーの式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E - P) + \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial}{\partial Z}(WE) = \frac{P_h}{A} \langle q \rangle \quad (3.2-2)$$

状態方程式

$$\rho = \rho(E, P) \quad (3.2-3)$$

ただし、

$\rho$  ; 密度

$A$  ; 断面積

$W$  ; 流量

$Z$  ; 流れ方向座標

$t$  ; 時間

$P_h$  ; 伝熱面積密度

$\langle \rangle$  ; 平均

$P$  ; 圧力

$q$  ; ヒートフラックス

$E$  ; 水/蒸気エンタルピ

## (ii) 差分式の展開

基礎式をインプリシットに展開し、また伝熱計算に伴う熱流束をインプリシットに展開し、計算の安定性を得る。

基礎式、式 (-1) 、式 (-2) を軸方向に積分すれば、

$$\Delta Z_i \frac{\partial m_i}{\partial t} + \frac{1}{A_i} (W_i - W_{i-1}) = 0 \quad (3.2-4)$$

$$m_i = \frac{1}{Z_i - Z_{i-1}} \int_{Z_{i-1}}^{Z_i} \rho dZ$$

$$\Delta Z_i \frac{\partial e_i}{\partial t} - \Delta Z_i \frac{\partial P_i}{\partial t} + \frac{1}{A_i} (W_i E_i - W_{i-1} E_{i-1}) = \left( \frac{P_h}{A} \right)_i \Delta Z_i \langle q \rangle_i \quad (3.2-5)$$

$$e_i = \frac{1}{Z_i - Z_{i-1}} \int_{Z_{i-1}}^{Z_i} \rho E dZ$$

$$\langle q \rangle_i = \frac{1}{Z_i - Z_{i-1}} \int_{Z_{i-1}}^{Z_i} q dZ \quad (3.2-6)$$

また、

$$m_i = m(E_{i-1}, E_i, P_r)$$

$$e_i = e(E_{i-1}, E_i, P_r)$$

であり、式 (3.2-4) 及び式 (3.2-5) を流れ方向に差分化すれば次の通りとなる。

$$\left( \frac{\partial m_i}{\partial E_{i-1}} + \frac{\partial m_i}{\partial E_i} \right) \frac{dE_i}{dt} + \frac{\partial m_i}{\partial P_r} \frac{dP_r}{dt} + \frac{1}{A_i} \frac{(W_i - W_{i-1})}{\Delta Z_i} = 0 \quad (3.2-7)$$

$$\left( \frac{\partial e_i}{\partial E_{i-1}} + \frac{\partial e_i}{\partial E_i} \right) \frac{dE_i}{dt} + \left( \frac{\partial e_i}{\partial P_r} - 1 \right) \frac{dP_r}{dt} + \frac{1}{A_i} \left( \frac{W_i E_i - W_{i-1} E_{i-1}}{\Delta Z_i} \right) = \left( \frac{P_{hi}}{A_i} \right) < q >_i \quad (3.2-8)$$

また、

$$\Delta E_i^{k+1} = E_i^{k+1} - E_i^k \quad \Delta W_i^{k+1} = W_i^{k+1} - W_i^k \quad \Delta P_r^{k+1} = P_r^{k+1} - P_r^k$$

$$W_i^{k+1} E_i^{k+1} = (W_i^k + \Delta W_i^{k+1})(E_i^k + \Delta E_i^{k+1})$$

$$= W_i^k E_i^k + \Delta W_i^{k+1} E_i^k + W_i^k \Delta E_i^{k+1}$$

$$= W_i^k \Delta E_i^{k+1} + W_i^{k+1} E_i^k$$

とし、式 (3.2-7) 及び式 (3.2-8) を時間に対し差分すると、

$$\begin{aligned} & \left( \frac{\partial m_i}{\partial E_{i-1}} + \frac{\partial m_i}{\partial E_i} \right)^k \Delta E_i^{k+1} + \left( \frac{\partial m_i}{\partial P_r} \right)^k \Delta P_r^{k+1} \\ & + \frac{\Delta t^{k+1}}{\Delta Z_i A_i} [\theta W_i^{k+1} + (1-\theta) W_i^k - \theta W_{i-1}^{k+1} - (1-\theta) W_{i-1}^k] = 0 \end{aligned} \quad (3.2-9)$$

$$\begin{aligned} & \left( \frac{\partial e_i}{\partial E_{i-1}} + \frac{\partial e_i}{\partial E_i} \right)^k \Delta E_i^{k+1} + \left( \frac{\partial e_i}{\partial P_r} - 1 \right)^k \Delta P_r^{k+1} \\ & + \frac{\Delta t^{k+1}}{A_i \Delta Z_i} [\theta (W_i^k \Delta E_i^{k+1} + E_i^k W_i^{k+1}) + (1-\theta) W_i^k E_i^k \\ & - \theta (W_{i-1}^k \Delta E_{i-1}^{k+1} + E_{i-1}^k W_{i-1}^{k+1}) - (1-\theta) W_{i-1}^k E_{i-1}^k] = \Delta t^{k+1} \left( \frac{P_h}{A} \right)_i < q >_i \end{aligned} \quad (3.2-10)$$

ここで、伝熱による熱流束を次のようにインプリシットに展開し、伝熱量に関しても計算の安定化を計る。

$$\langle q \rangle_i^{k+1} = \alpha_i^k (T_i^k - (\bar{T}_i^k + \Delta \bar{T}_i^{k+1})) \quad \text{とすると、}$$

$$\langle q \rangle_i = (1 - \theta) \langle q \rangle_i^k + \theta \langle q \rangle_i^{k+1}$$

$$= \langle q \rangle_i^k - \theta \alpha_i^k \Delta \bar{T}_i^{k+1}$$

$$\text{また、} \Delta T = \left( \frac{\partial T}{\partial E} \right)_P \Delta E + \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_E \Delta P \text{であるから、}$$

$$\Delta \bar{T}_i^{k+1} = \frac{1}{2} \beta_w \left( \frac{\partial T}{\partial E_{i-1}} \right)_P \Delta E_{i-1}^{k+1} + \left( 1 - \frac{1}{2} \beta_w \right) \left( \frac{\partial T}{\partial E_i} \right)_P \Delta E_i^{k+1} + \left( \frac{\partial T}{\partial P_r} \right)_{E_{i-\frac{1}{2}}} \Delta P_r^{k+1}$$

( $\beta_w$ は $0 \leq \beta_w \leq 1.0$ であり、 $\beta_w=1.$ で中心差分、 $\beta_w=0.$ で出口代表)

以上をエネルギー式 (3.2-10) に代入し、連続の式 (3.2-9) と連立させて  $\Delta E_i^{k+1}$ 、 $W_i^{k+1}$  について整理すると以下の通りとなる。

$$\Delta E_i^{k+1} = C_1 \Delta E_{i-1}^{k+1} + C_2 \Delta P_r^{k+1} + C_3 W_{i-1}^{k+1} + C_4 \quad (3.2-11)$$

$$W_i^{k+1} = C_5 W_{i-1}^{k+1} + C_6 \Delta E_{i-1}^{k+1} + C_7 \Delta P_r^{k+1} + C_8 \quad (3.2-12)$$

ここで、 $\theta$  は  $0 \leq \theta \leq 1$  であり、 $\theta=0.5$ でCrank-Nicolson、 $\theta=1.0$ でImplicitとなる。

従って、式 (3.2-11) ～式 (3.2-12) は、最上流の  $\Delta E_{in}^{k+1}$ 、 $W_{in}^{k+1}$  を入口境界条件として与えれば、上流側から流れ方向に順次計算できる。

尚、式 (3.2-11) ～式 (3.2-12) において用いられた係数の内容は以下の通りである。

$$C_1 = \frac{\Delta t^{k+1} \theta}{C_0} \left\{ \frac{W_{i-1}^k}{V_i} - \frac{1}{2} \beta_w \left( \frac{P_h}{A} \right)_i \alpha_i^k \left( \frac{\partial T}{\partial E_{i-1}} \right)_P \right\}$$

$$C_2 = \frac{1}{C_0} \left\{ E_i^k \left( \frac{\partial m_i}{\partial P_r} \right)^k + 1 - \left( \frac{\partial e_i}{\partial P_r} \right)^k - \Delta t^{k+1} \left( \frac{P_h}{A} \right)_i \theta \alpha_i^k \left( \frac{\partial T}{\partial P_r} \right)_{E_{i-\frac{1}{2}}} \right\}$$

$$C_3 = \frac{1}{C_0} \frac{\Delta t^{k+1}}{V_i} \theta (E_{i-1}^k - E_i^k)$$

$$C_4 = \frac{1}{C_0} \Delta t^{k+1} \left[ \left( \frac{P_h}{A} \right)_i \langle q_i \rangle + \frac{(1-\theta)}{V_i} W_{i-1}^k (E_{i-1}^k - E_i^k) \right]$$

$$C_5 = 1 - \frac{C_3 V_i}{\theta \Delta t^{k+1}} \left( \frac{\partial m_i}{\partial E_{i-1}} + \frac{\partial m_i}{\partial E_i} \right)^k$$

$$C_6 = \frac{-V_i}{\theta \Delta t^{k+1}} \left( \frac{\partial m_i}{\partial E_i} + \frac{\partial m_i}{\partial E_{i-1}} \right)^k \quad (3.2-13)$$

$$C_7 = \frac{-V_i}{\theta \Delta t^{k+1}} \left\{ \left( \frac{\partial m_i}{\partial P_i} \right)^k + C_2 \left( \frac{\partial m_i}{\partial E_{i-1}} + \frac{\partial m_i}{\partial E_i} \right)^k \right\}$$

$$C_8 = \frac{-V_i}{\theta \Delta t^{k+1}} \left\{ \left( \frac{\partial m_i}{\partial E_{i-1}} + \frac{\partial m_i}{\partial E_i} \right)^k \cdot C_4 + \frac{1-\theta}{\theta} (W_{i-1}^k - W_i^k) \right\}$$

$$C_0 = \left( \frac{\partial e_i}{\partial E_{i-1}} + \frac{\partial e_i}{\partial E_i} \right)^k - E_i^k \left( \frac{\partial m_i}{\partial E_{i-1}} + \frac{\partial m_i}{\partial E_i} \right)^k + \frac{\Delta t^{k+1} \theta W_i^k}{V_i}$$

$$+ \Delta t^{k+1} \left( \frac{P_h}{A} \right)_i \theta \alpha_i^k \left( 1 - \frac{\beta_w}{2} \right) \left( \frac{\partial T}{\partial E_i} \right)_{pr}$$

$$V_i = \Delta Z_i A_i$$

リンクのメッシュ  $i$  の平均密度  $m_i$  と平均エンタルピー  $e_i$  は相変化を考慮し次式で計算。

$$E_{i-1} < E_i < E_f$$

$$m_i = (\rho_i + \rho_{i-1})/2$$

$$e_i = \frac{1}{6} [(2E_i + E_{i-1})\rho_i + (2E_{i-1} + E_i)\rho_{i-1}]$$

$$E_{i-1} < E_f < E_i$$

$$m_i = \frac{1}{2} \beta_i (\rho_{i-1} + \rho_f) + (1-\beta) \frac{\ell n(v_i/v_f)}{v_i - v_f}$$

$$e_i = \frac{1}{6} \beta_i [(2E_f + E_{i-1})\rho_i + (2E_{i-1} + E_f)\rho_{i-1}]$$

$$+ (1-\beta_i) \left[ \frac{E_i - E_f}{v_i - v_f} + \frac{(E_f v_i - E_i v_f) \ell n(v_i/v_f)}{(v_i - v_f)^2} \right] \quad (3.2-14)$$

$$E_f < E_{i-1} < E_i$$

$$m_i = \frac{\ln(v_i/v_{i-1})}{v_i - v_{i-1}}$$

$$e_i = \frac{E_i - E_{i-1}}{v_i - v_{i-1}} + \frac{(E_{i-1} v_i - E_i v_{i-1})}{(v_i - v_{i-1})^2} \ell n(v_i/v_{i-1})$$

ここで、 $E_f$  は飽和エンタルピー、また、 $v=1/\rho$  である。



$$\begin{aligned}\frac{\partial m_i}{\partial E_{i-1}} &= \frac{m_i - \rho_{i-1}}{E_i - E_{i-1}} \\ \frac{\partial m_i}{\partial E_i} &= \frac{\rho_i - m_i}{E_i - E_{i-1}} \\ \frac{\partial e_i}{\partial E_{i-1}} &= \frac{e_i - \rho_{i-1} E_{i-1}}{E_i - E_{i-1}}\end{aligned}\tag{3.2-15}$$

$$\frac{\partial e_i}{\partial E_i} = \frac{\rho_i E_i - e_i}{E_i - E_{i-1}}$$

$$\beta_i = \frac{E_i - E_{i-1}}{E_i - E_{i-1}}$$

$$\frac{\partial m_i}{\partial P_r} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_E$$

$$\frac{\partial e_i}{\partial P_r} = \frac{1}{2} E_i \left( \frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_E$$

ここで  $\left( \frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_E$  は、状態方程式を  $P_r$  に関して摂動させることによって求める。

### (iii) 境界条件

入口条件を図3.2-5の通り、時系列データとして設定する。圧力は管内一様として、 $P_r$ で代表する。

$$\begin{aligned}\Delta P_r^{k+1} &= f_{Pin}(t + \Delta t) - f_{Pin}(t) \\ \Delta E_{in}^{k+1} &= f_{Hin}(t + \Delta t) - f_{Hin}(t)\end{aligned}\quad \text{..... SI単位系}$$

### (c) 伝熱管温度計算モデル

SG伝熱管に関する温度計算式は、軸方向熱伝達を無視した次式で表し、

$$\frac{dT_{ti}}{dt} = \frac{1}{A_{ti} \rho_i C_{pi}} P_{hi} \{ < q_N >_i - < q > \}\tag{3.2-16}$$

差分化すれば、

$$< q > = h_i^{k+1} (T_{ti}^{k+1} - \bar{T}_i^{k+1})$$

$$\frac{T_{ti}^{k+1} - T_{ti}^k}{\Delta t} = \frac{1}{C_i} P_{hi} \{ < q_N >_i^k - h_i^{k+1} (T_{ti}^{k+1} - \bar{T}_i^{k+1}) \}\tag{3.2-17}$$

上式を  $T_{ti}^{k+1}$  について解けば、次式となる。

$$T_{ii}^{k+1} = \frac{T_{ii}^k + \frac{\Delta t P_{hi}}{C_i} \left( \langle q_N \rangle_i^k + h_i^{k+1} \cdot \bar{T}_i^{k+1} \right)}{1 + \frac{\Delta t P_{hi}}{C_i} \cdot h_i^{k+1}} \quad (3.2-18)$$

ここで、 $h_i$  は、一般に  $T_{ii}$  の依存性を有するため式 (3.2-18) は、繰り返し代入計算を行い、 $T_{ii}^{k+1}$  について収束させる。

$$\left( T_{ii}^{k+1} \right)^{n+1} = \alpha \cdot \frac{T_{ii}^k + \frac{\Delta t P_{hi}}{C_i} \left( \langle q_N \rangle_i^k + \left( h_i^{k+1} \right)^n \cdot \bar{T}_i^{k+1} \right)}{1 + \frac{\Delta t P_{hi}}{C_i} \cdot \left( h_i^{k+1} \right)^n} + (1-\alpha) \left( T_{ii}^{k+1} \right)^n \quad (3.2-19)$$

$$\left( h_i \right)^n = h_i \left( \bar{T}_i^{k+1}, \left( T_{ii}^{k+1} \right)^n \right)$$

$$0 < \alpha \leq 1.0$$

ここで、 $\alpha$  は、緩和因子、 $n$  は、繰り返し計算回数であり、 $n = 1$  の時の右辺に含まれる  $T_{ii}$  は、 $T_{ii}^k$  がもちいられる。また、解の収束判定は以下の様に行なわれる。

$$\frac{\left| \left( T_{ii}^{k+1} \right)^n - \left( T_{ii}^{k+1} \right)^{n-1} \right|}{\left( T_{ii}^{k+1} \right)^n} \leq \varepsilon_t \quad (3.2-20)$$

#### (d) 水側熱伝達率相関式

##### (i) SG設計式

定常モデルの場合と同じであり、表3.2-1 にSG設計使用熱伝達率一覧表を示す。

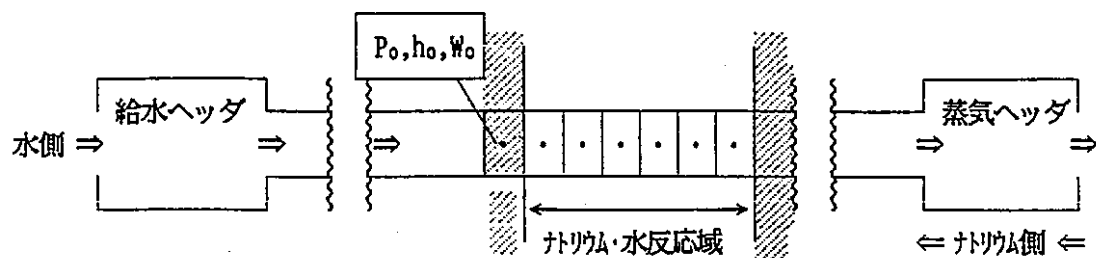
##### (ii) LOCA解析用相関式

SG 高温ラプチャー評価用モデルとして提案されている、軽水炉の LOCA 解析用相関式、及びバーンアウト熱流束評価式を組み込むこととした。(図3.2-3 に熱伝達率評価用相関図を、また、具体的な相関式を添付資料Eに示す。)

表3.2-1 使用伝熱計算式一覧

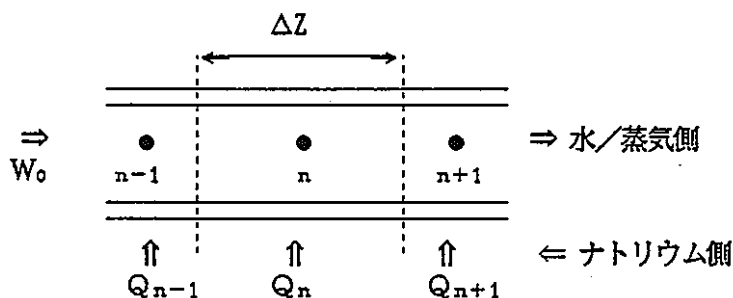
| 領 域            |    | 熱 伝 達 率 評 価 式                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |  | 備 考                                |
|----------------|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|------------------------------------|
| SG<br>コイル<br>部 |    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |  |                                    |
|                | 水側 | $\alpha_i = \frac{\lambda_l}{D_i} \left[ \frac{1}{41} \frac{Pr_l}{Pr_l^{0.6} - 0.062} Re_l^{5/6} \left( \frac{D_i}{D_{coil}} \right)^{1/18} \left[ 1 + \frac{0.061}{\left\{ Re_l \left( \frac{D_i}{D_{coil}} \right)^{2.5} \right\}^{1/8}} \right] \right] \quad (Tw \leq Tsat)$                                                       |  | 森・中山液相（液単相部）                       |
|                |    | $\alpha_i = 2.5 \left( \frac{1}{X_{tt}} \right)^{0.75} \alpha_{i1} \cdot \left( \frac{1}{X_{tt}} \right) = \left( \frac{X}{1-X} \right)^{0.9} \left( \frac{\gamma_l}{\gamma_g} \right)^{0.5} \left( \frac{\mu_g}{\mu_l} \right)^{0.1} \quad (Tw > Tsat, X \leq X_{DNB})$ <p>ただし、<math>\alpha_{i1}</math> は森・中山液相の式を核沸騰領域まで内挿した値である</p> |  | 修正Shrock-Grossman<br>(サブクール及び核沸騰部) |
|                |    | 修正Shrock-Grossman $X=X_{DNB}$ と森・中山の式を $X$ で内挿 $(X_{DNB} < X \leq 1.0)$                                                                                                                                                                                                                                                                |  | (膜沸騰部)                             |
|                |    | $\alpha_i = \frac{\lambda_g}{D_i} \left[ \frac{1}{26.2} \frac{Pr_g}{Pr_g^{2/3} - 0.074} Re_g^{4/5} \left( \frac{D_i}{D_{coil}} \right)^{1/10} \left[ 1 + \frac{0.098}{\left\{ Re_g \left( \frac{D_i}{D_{coil}} \right)^2 \right\}^{1/5}} \right] \right] \quad (X \geq 1.0)$                                                           |  | 森・中山気相（過熱蒸気部）                      |

|             |        |                          |              |          |                         |            |       |                      |
|-------------|--------|--------------------------|--------------|----------|-------------------------|------------|-------|----------------------|
| $X$ ;       | クオリティ  | [-]                      | $H_{fg}$ ;   | 蒸発替熱     | [kcal/kg]               | $G$ ;      | 流 量   | [kg/sec]             |
| $a$ ;       | 熱伝導率   | [kcal/m <sup>2</sup> s℃] | $C_p$ ;      | 定圧比熱     | [kcal/kg℃]              | $\sigma$ ; | 表面張力  | [kg/m]               |
| $\lambda$ ; | 熱伝導率   | [kcal/ms℃]               | $\mu$ ;      | 静ねん性係数   | [kgm/sec]               | $r$ ;      | 比 重 量 | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| $D$ ;       | 管 直 径  | [m]                      | $D_{coil}$ ; | コイル巻径    | [m]                     | $i$ ;      | 内 側   |                      |
| $Pe$ ;      | ペクレ数   | [-]                      | $q$ ;        | ヒートフラックス | [kcal/m <sup>2</sup> s] | $o$ ;      | 外 側   |                      |
| $Re$ ;      | レイノズル数 | [-]                      | $X_{DNB}$ ;  | DNBクオリティ | [-]                     | $l$ ;      | 液 相   |                      |
| $Pr$ ;      | プラントル数 | [-]                      | $K$ ;        | 補正係数     | [-]                     | $g$ ;      | 気 相   |                      |



※  $P_0, h_0, W_0$  を境界条件として解く  
(但し、 $P, W$  は計算体系内で一定)

図3.2-1 計算モデルとメッシュ分割概念



$$\text{反応入熱: } Q_n = 2\pi K_n \cdot \Delta Z (T_{Nn} - T_{Wn})$$

$$\Delta H_{Wn} = Q_n / W_0$$

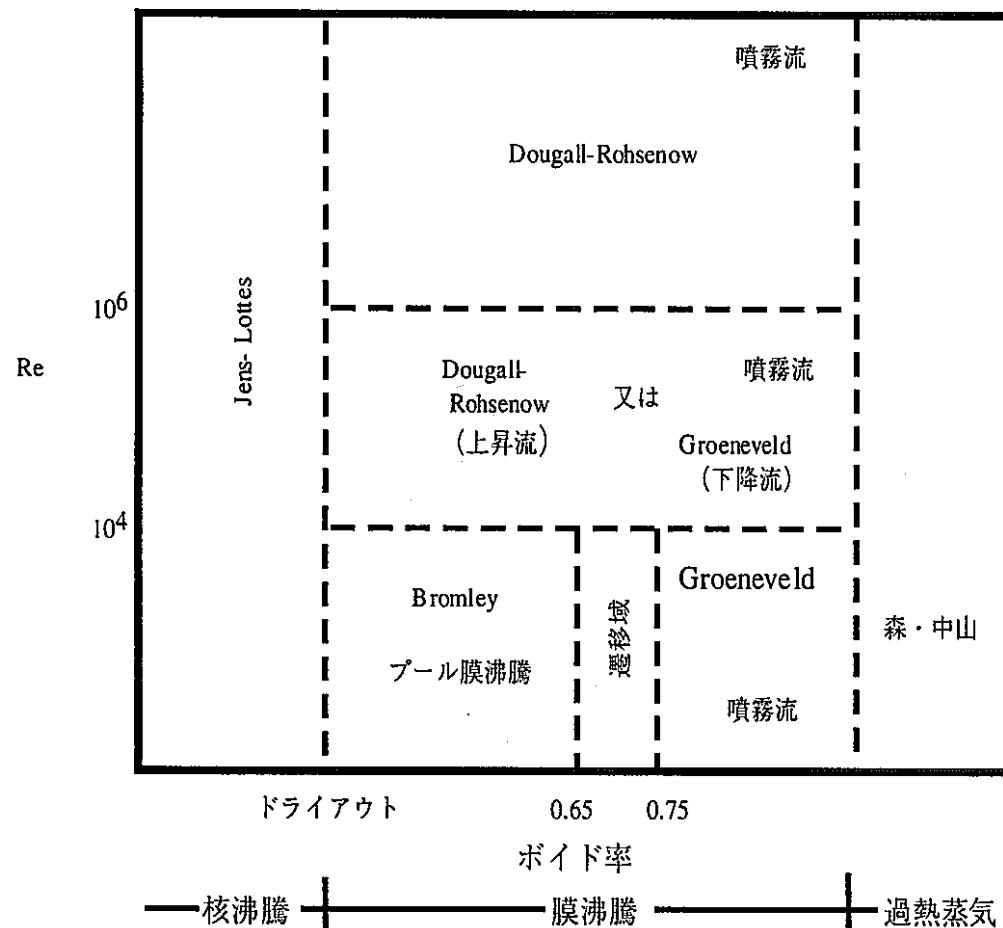
但し、

$$\frac{1}{K_n} = \frac{1}{h_{Wn} \cdot r_i} + \frac{\ln(r_o/r_i)}{\lambda} + \frac{1}{h_{Nn} \cdot r_o} + \frac{1}{\gamma_w \cdot r_i}$$

ここで、

|                        |                                       |
|------------------------|---------------------------------------|
| $n$ : メッシュ番号           | $h_{Wn}, h_{Nn}$ : 水側、ナトリウム側熱伝達率      |
| $Q_n$ : 伝熱量            | $\gamma_w$ : 水側汚れ係数                   |
| $K_n$ : 熱貫流率           | $T_{Wn}, T_{Nn}$ : 水/蒸気側、ナトリウム側入口代表温度 |
| $H_{Wn}$ : 水/蒸気側エンタルピー | $T_{Nn}, h_{Nn}$ は入力である               |
| $W_0$ : 水/蒸気流量         |                                       |

図3.2-2 エネルギーバランス計算式



核沸騰：伝熱面の過熱度 $\Delta T_{sat}$ に依存

プール沸騰、強制対流沸騰、サブクール沸騰の何れでもあまり違いはない。

伝熱面の水平、垂直、傾斜等の影響小。

膜沸騰：過熱面と液体との間の安定した蒸気膜を介しての熱伝達。

強制対流条件でも、熱流束が著しく大きい場合にはプール膜沸騰と同様の状態となる。

[逆環状流] 伝熱面を蒸気膜が覆って、中心は気泡を含む液体。低クオリティ領域で出現。

(プール膜沸騰と似た状態)

[噴霧流] 蒸気の中を液体が液滴として流れる形態。

高クオリティ領域で出現。蒸気流による強制対流熱伝達が主体。

[遷移域] 逆環状流と噴霧流が混在した状態。

BWRと同様プール膜沸騰と噴霧流熱の熱伝達からボイド率により内挿。

蒸気・水単相熱伝達：森中山の式

・原研の低流量熱伝達実験 ( $0.3-1 \times 1.0 \text{E}6 \text{kg/m}^2\text{h}$  :

約10-40kg/s相当) ではDougall-Rohsenow は過大評価

Groeneveldの式が比較的合うとの結果

・ATRの試験結果

上昇流： $Re \geq 1\text{E}4$ はDougall-Rohsenowに合う

下降流：高流量  $Re \geq 1\text{E}6$  : Dougall-Rohsenowに合う

低流量  $Re < 1\text{E}6$  : Dougall-Rohsenowより小

図3.2-3 SG 伝熱管内熱伝達率評価用相関図

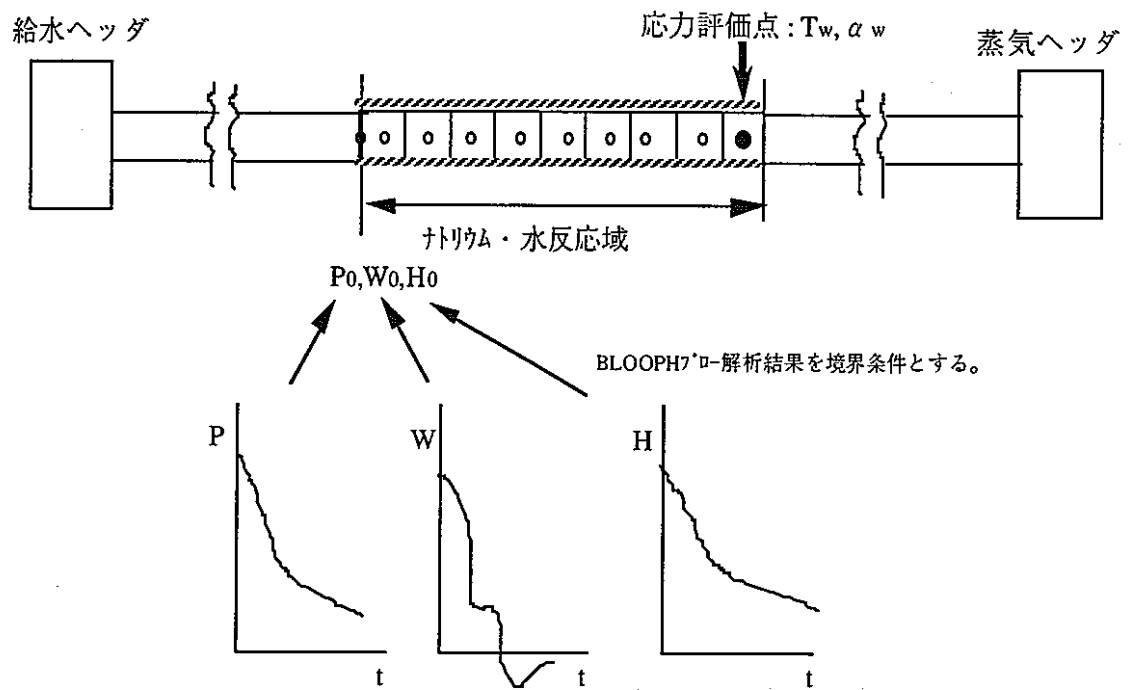


図3.2-4 計算モデルとメッシュ分割概念

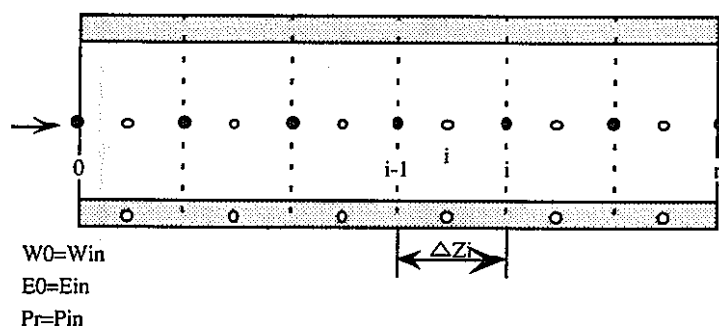


図3.2-5 水側計算モデル図

### 3.3 補正計算の条件

補正計算の対象は、通常運転中（100% 及び40% 部分出力）と水ブロー途中である。

前節で記載したように結果に比較的大きな影響を及ぼす入力条件が存在する。これらのうち現状確定できないものは、これまでの試験結果等を参考にパラメータとして計算し影響を把握することとした。パラメータは以下の通り。

- |              |                                                                      |
|--------------|----------------------------------------------------------------------|
| ・ 反応域温度／熱伝達率 | 1200℃/6000kcal/m <sup>2</sup> h℃<br>1100℃/8600kcal/m <sup>2</sup> h℃ |
| ・ 水側熱伝達率相関   | SG 設計式又は LOCA の式                                                     |
| ・ 反応域長さ      | 0.5 m 又は 1.3 m                                                       |

尚、水ブロー途中の評価対象部位は、従来の解析経験から、低流量が比較的に長い時間続き評価上厳しい、次のリンクとした。

- |                |           |
|----------------|-----------|
| 100% 出力からのブロー  | リンク 6、8、9 |
| 40%部分 出力からのブロー | リンク 9、12  |

### 3.4 補正計算の結果

#### 3.4.1 通常運転中の水側状態量の補正

ここでは 100% 出力、及び、40% 出力運転時の蒸発器 (EV) 管束部上部と下部における水リーク（水リーク率 2 kg/s）による Na-水反応による水側状態量の補正を行う。

また、作業の途中で評価が必要となった、10% 出力運転時の Na- 反応時水側状態量の補正結果については添付資料 B に示す。(B-69ページ参照)

##### (1) 全体加熱による影響

|             |                                                                          |                                                                          |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 発生熱量        | 2,486 kcal/s (H6 年度報告書) <sup>3)</sup>                                    |                                                                          |
| <100% 出力>   | 管束上部 (EV 出口)                                                             | 管束下部 (EV 入口)                                                             |
| エンタルピー上昇    | $\frac{2,486 \text{ kcal/s}}{105.3 \text{ kg/s}} = 23.6 \text{ kcal/kg}$ | $\frac{2,486 \text{ kcal/s}}{105.3 \text{ kg/s}} = 23.6 \text{ kcal/kg}$ |
| 反応域入口エンタルピー |                                                                          |                                                                          |
|             | $681.2 + 23.6 = 704.8 \text{ kcal/kg}$                                   | $248.2 + 23.6 = 271.8 \text{ kcal/kg}$                                   |
| 圧力          | 145 atg                                                                  | 153 atg                                                                  |
| <40% 出力>    |                                                                          |                                                                          |
| エンタルピー上昇    | $\frac{2,486 \text{ kcal/s}}{43.1 \text{ kg/s}} = 57.7 \text{ kcal/kg}$  | $\frac{2,486 \text{ kcal/s}}{43.1 \text{ kg/s}} = 57.7 \text{ kcal/kg}$  |
| 反応域入口エンタルピー |                                                                          |                                                                          |
|             | $695 + 57.7 = 752.7 \text{ kcal/kg}$                                     | $200 + 57.7 = 257.7 \text{ kcal/kg}$                                     |
| 圧力          | 130.5 atg                                                                | 131 atg                                                                  |

##### (2) 局所加熱による影響 (RUPIN による補正)

###### (a) 反応域入口水側条件

全体加熱を考慮した反応域入口水側条件を表3.4-1 に示す。

###### (b) 反応域側温度、熱伝達率条件

SWAT-3 Run-16、19 のデータを基に設定された下記条件 (B-4 ページ参照) とする。

|                |         |       |                             |
|----------------|---------|-------|-----------------------------|
| 反応域中心より上下 (左右) | ±100 mm | 1200℃ | 3500 kcal/m <sup>2</sup> h℃ |
| 反応域中心より上下 (左右) | ±150 mm | 1150℃ | 4000 kcal/m <sup>2</sup> h℃ |
| 反応域中心より上下 (左右) | ±200 mm | 1100℃ | 5000 kcal/m <sup>2</sup> h℃ |



反応域中心より上下（左右） $\pm 250$  mm 1000℃ 8600 kcal/m<sup>2</sup>h℃

(c) 水側熱伝達率関連式等

SG 設計式（管束下部に対しては LOCA 式も適用）

伝熱管肉厚 3.8 mm

(d) 計算結果

各ケースの計算結果を表3.4-2 に示す。

表3.4-1 全体加熱を考慮した反応域入口水側条件

| ケース | 条件     | 圧力<br>(kg/cm <sup>2</sup> g) | 流量<br>(kg/s) | エンタルピー<br>(kcal/kg) |
|-----|--------|------------------------------|--------------|---------------------|
| 1   | 100%出口 | 145                          | 105.3        | 704.8               |
| 2   | 100%入口 | 153                          | 105.3        | 271.8               |
| 3   | 40%出口  | 130.5                        | 43.1         | 752.7               |
| 4   | 40%入口  | 131.0                        | 43.1         | 257.7               |

表3.4-2 100% 出力及び 40% 出力運転時の EV 管束部上部と下部の水側状態量補正結果

| ケース<br>No | 条件     | 計算条件サーベイパラメータ     |                                              |              |               |           |                |                 |                     | 計算結果   |        |            |       |                                         |        |              |        |
|-----------|--------|-------------------|----------------------------------------------|--------------|---------------|-----------|----------------|-----------------|---------------------|--------|--------|------------|-------|-----------------------------------------|--------|--------------|--------|
|           |        | Na側反応領域<br>温度 (℃) | Na側反応域<br>熱伝達率<br>(kcal/m <sup>2</sup> -h-℃) | 反応域長さ<br>(m) | 伝熱管肉厚<br>(mm) | 出力<br>(%) | 給水流量<br>(kg/s) | 圧力<br>(kg/cm.a) | エンタルピー<br>(kcal/kg) | メッシュNo |        | 水側温度TX (℃) |       | 管内熱伝達率AWX<br>(kcal/m <sup>2</sup> -h-℃) |        | 伝熱管温度STXX(℃) |        |
|           |        |                   |                                              |              |               |           |                |                 |                     | 設計式    | LOCA式  | 設計式        | LOCA式 | 設計式                                     | LOCA式  | 設計式          | LOCA式  |
| 1         | 100%出口 | 1200~1000         | 3500~8600                                    | 0.5          | 3.8           | 100       | 105.3          | 145             | 704.8               | 18     | -      | 409.0      | -     | 7179.2                                  | -      | 776.8        | -      |
| 2         | 100%入口 | 1200~1000         | 3500~8600                                    | 0.5          | 3.8           | 100       | 105.3          | 153             | 271.8               | 20     | 14     | 285.4      | 270.4 | 17520.3                                 | 2526.8 | 655.5        | 866.0  |
| 3         | 40%出口  | 1200~1000         | 3500~8600                                    | 0.5          | 3.8           | 40        | 43.1           | 130.5           | 752.7               | 14     | -      | 471.3      | -     | 3154.6                                  | -      | 909.0        | -      |
| 4         | 40%入口  | 1200~1000         | 3500~8600                                    | 0.5          | 3.8           | 40        | 43.1           | 131             | 257.7               | 20     | 7(=14) | 299.3      | 254.0 | 8574.3                                  | 828.9  | 715.5        | 1032.7 |

### 3.4.2 水ブロー中の水側状態量の補正

#### (1) 定常モデルと過渡モデルの比較

図3.4-1 ～ 図3.4-12 にケース 1 に対する定常モデルによる補正結果と過渡モデルによる補正結果を比較して示す。これには、伝熱管中心温度、水側温度、水側流量、水側熱伝達率、クオリティ、Re 数を比較しているが、図 3.4-1 ～ 図3.4-3 の伝熱管中心温度に見られる通り、高温ラプチャ評価上厳しい約 18s ～ 約 25s までの極低流量域での温度が過渡モデルでは（定常モデルでの過度の保守性が）緩和されている。

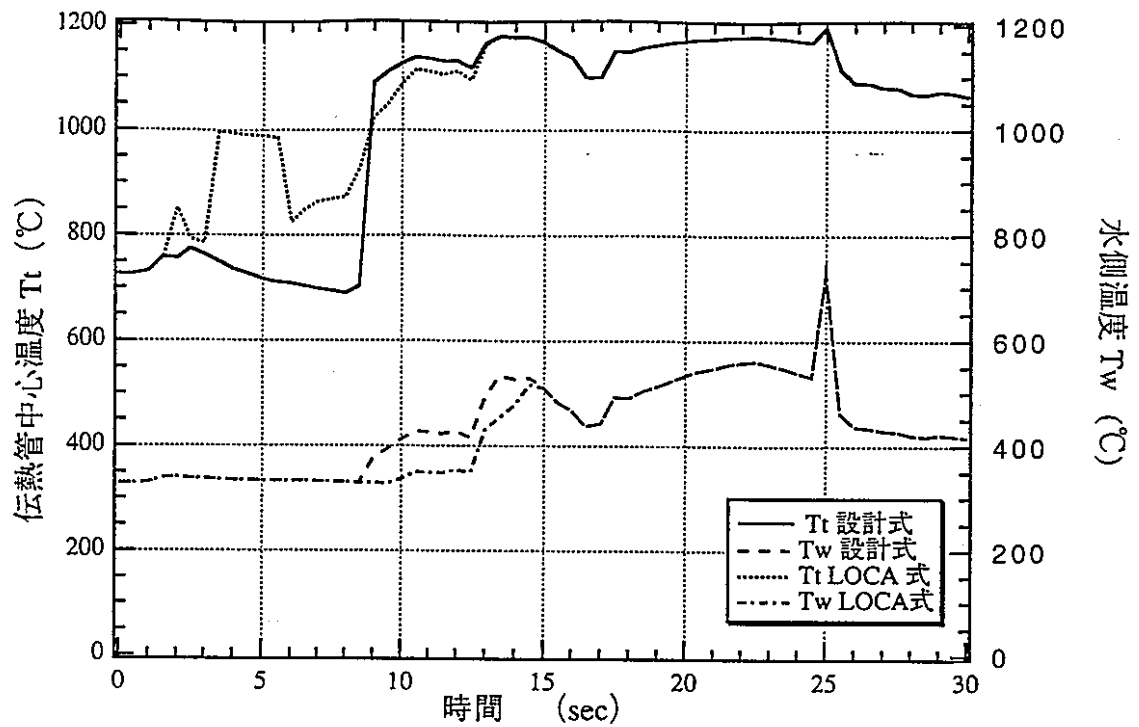
#### (2) 過渡モデル

3.3 節に記載したパラメータを組合せた解析ケースを表3.4-3 に示す。代表的な結果として図3.4-13 ～ 図3.4-48 にケース 2、ケース 3に対する補正結果を示す。

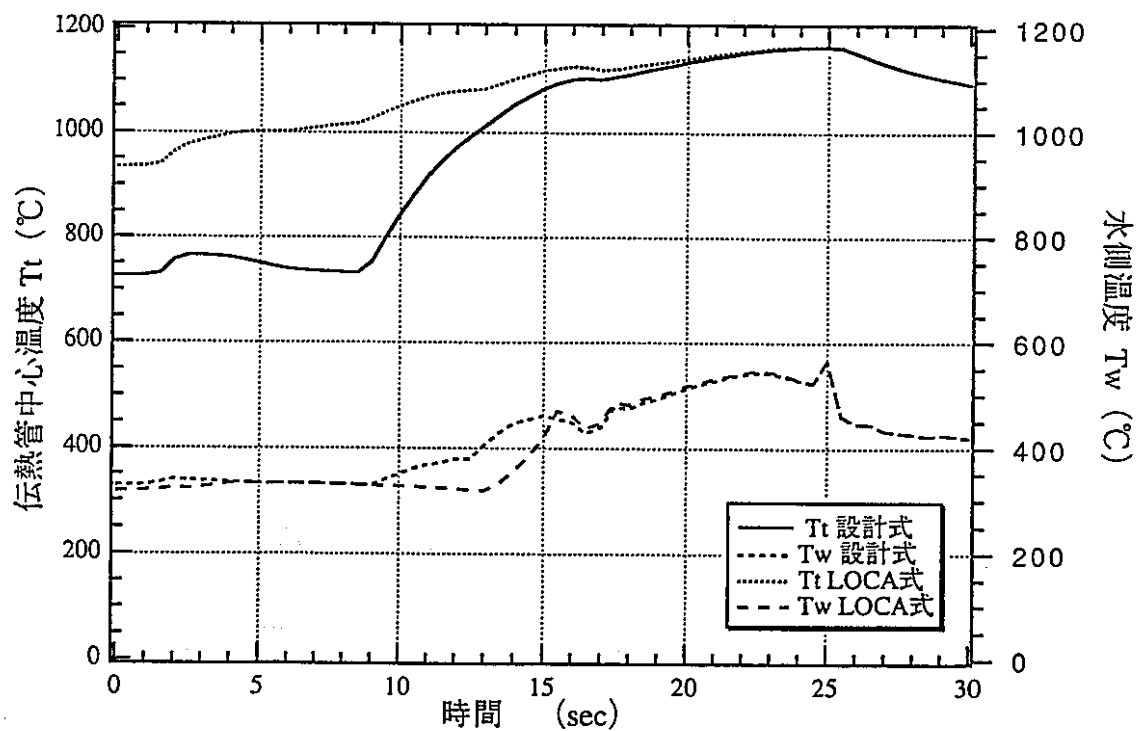
また、ケース 1 に対しパラメータのうち、反応域温度／熱伝達率の分布を考慮して計算した補正結果を添付資料Bに示す。

表3.4-3 MjSG ブロー解析ポスト処理 (RUPIN) 解析ケース (蒸発器)

| 解析ケース名 | ブロー解析条件 |       | 反応条件サーベイパラメータ |                                 |          |        | 出力  |
|--------|---------|-------|---------------|---------------------------------|----------|--------|-----|
|        | EV入口弁   | EV出口弁 | 反応温度(℃)       | 反応域熱伝達率(kcal/m <sup>2</sup> h℃) | 反応域長さ(m) | 水側熱伝達式 |     |
| 1-A(1) | 3B      | 4B    | 1200          | 6000                            | 0.5      | 設計式    | 定格  |
| 1-A(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-B(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 定格  |
| 1-B(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-C(1) | 同上      | 同上    | 1100          | 8600                            | 0.5      | 設計式    | 定格  |
| 1-C(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-D(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 定格  |
| 1-D(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 2-A(1) | 同上      | 6B    | 1200          | 6000                            | 0.5      | 設計式    | 定格  |
| 2-A(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 2-B(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 定格  |
| 2-B(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 2-C(1) | 同上      | 同上    | 1100          | 8600                            | 0.5      | 設計式    | 定格  |
| 2-C(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 2-D(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 定格  |
| 2-D(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 3-A(1) | 同上      | 8B    | 1200          | 6000                            | 0.5      | 設計式    | 定格  |
| 3-A(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 3-B(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 定格  |
| 3-B(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 3-C(1) | 同上      | 同上    | 1100          | 8600                            | 0.5      | 設計式    | 定格  |
| 3-C(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 3-D(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 定格  |
| 3-D(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 4-A(1) | 4B      | 6B    | 1200          | 6000                            | 0.5      | 設計式    | 定格  |
| 4-A(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 4-B(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 定格  |
| 4-B(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 4-C(1) | 同上      | 同上    | 1100          | 8600                            | 0.5      | 設計式    | 定格  |
| 4-C(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 4-D(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 定格  |
| 4-D(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 5-A(1) | 同上      | 8B    | 1200          | 6000                            | 0.5      | 設計式    | 定格  |
| 5-A(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 5-B(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 定格  |
| 5-B(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 5-C(1) | 同上      | 同上    | 1100          | 8600                            | 0.5      | 設計式    | 定格  |
| 5-C(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 5-D(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 定格  |
| 5-D(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 6-A(1) | 3B      | 4B    | 1200          | 6000                            | 0.5      | 設計式    | 40% |
| 6-A(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 40% |
| 6-B(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 40% |
| 6-B(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 40% |
| 6-C(1) | 同上      | 同上    | 1100          | 8600                            | 0.5      | 設計式    | 40% |
| 6-C(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 40% |
| 6-D(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 40% |
| 6-D(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 40% |

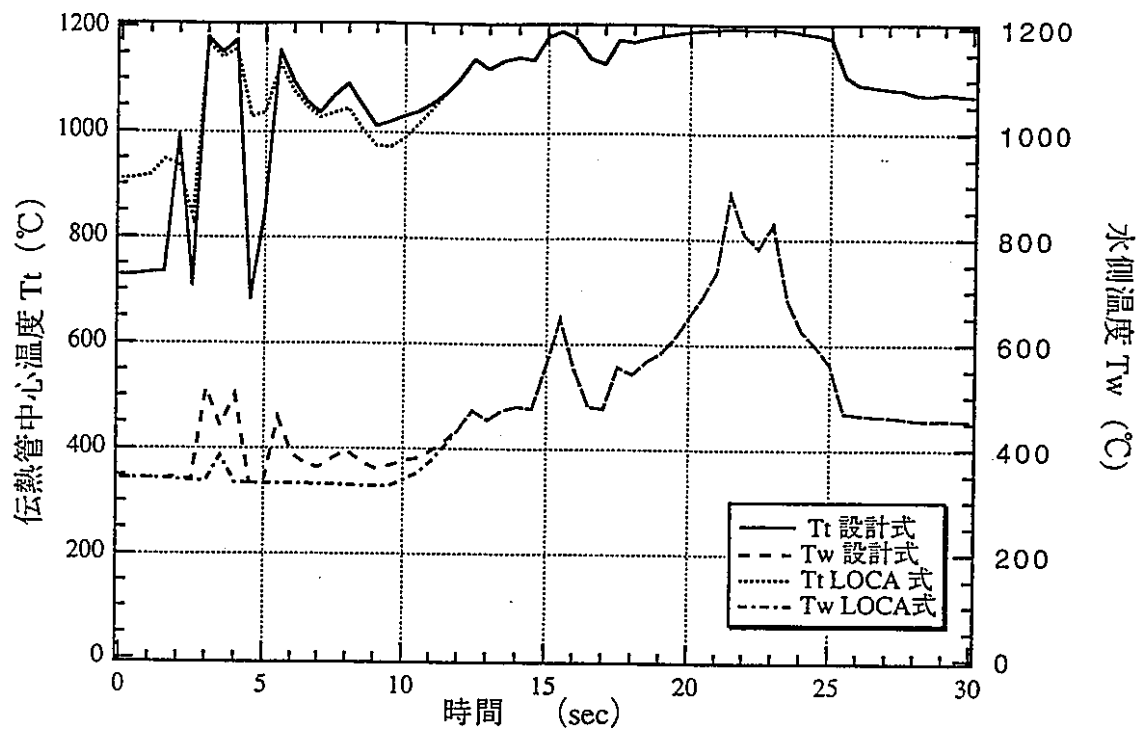


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (オリジナルモデル)

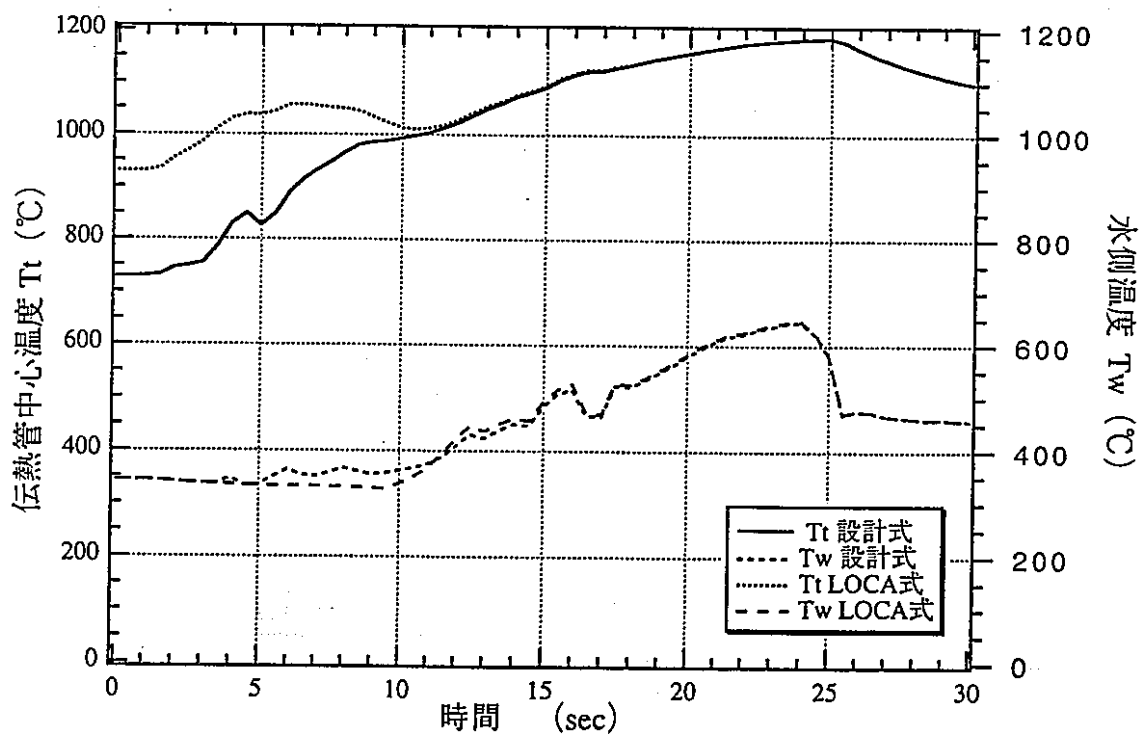


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (新モデル)

図3.4-1 伝熱管中心温度と水側温度 (EV リンク 6)

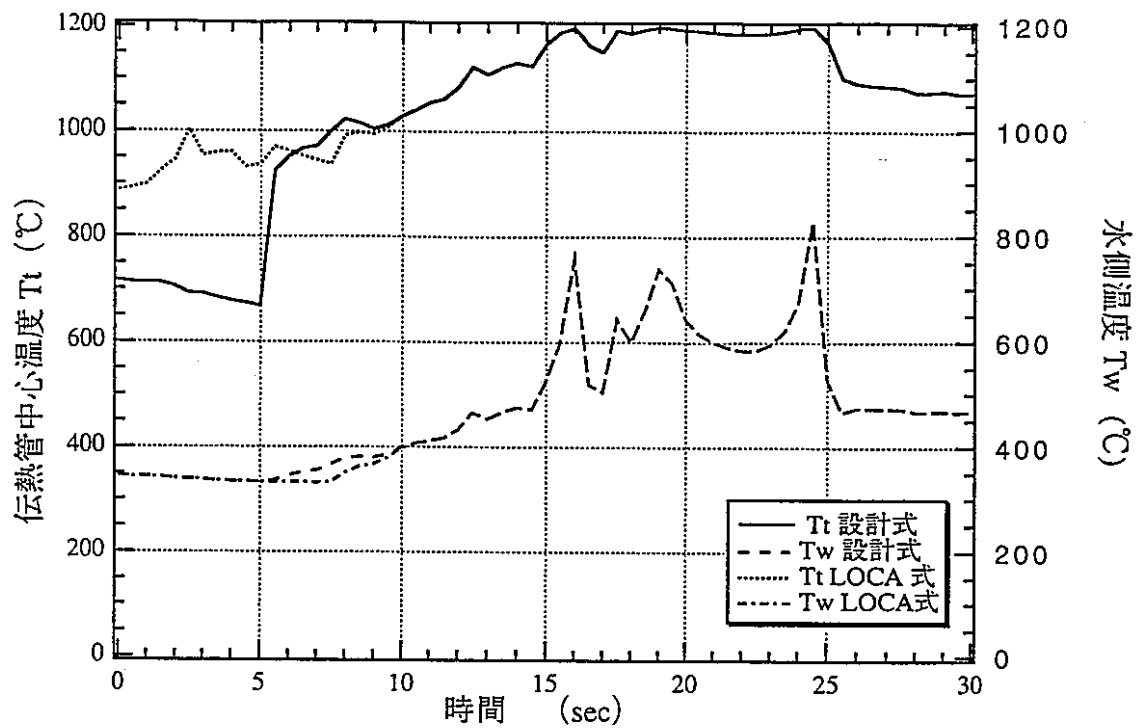


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (オリジナルモデル)

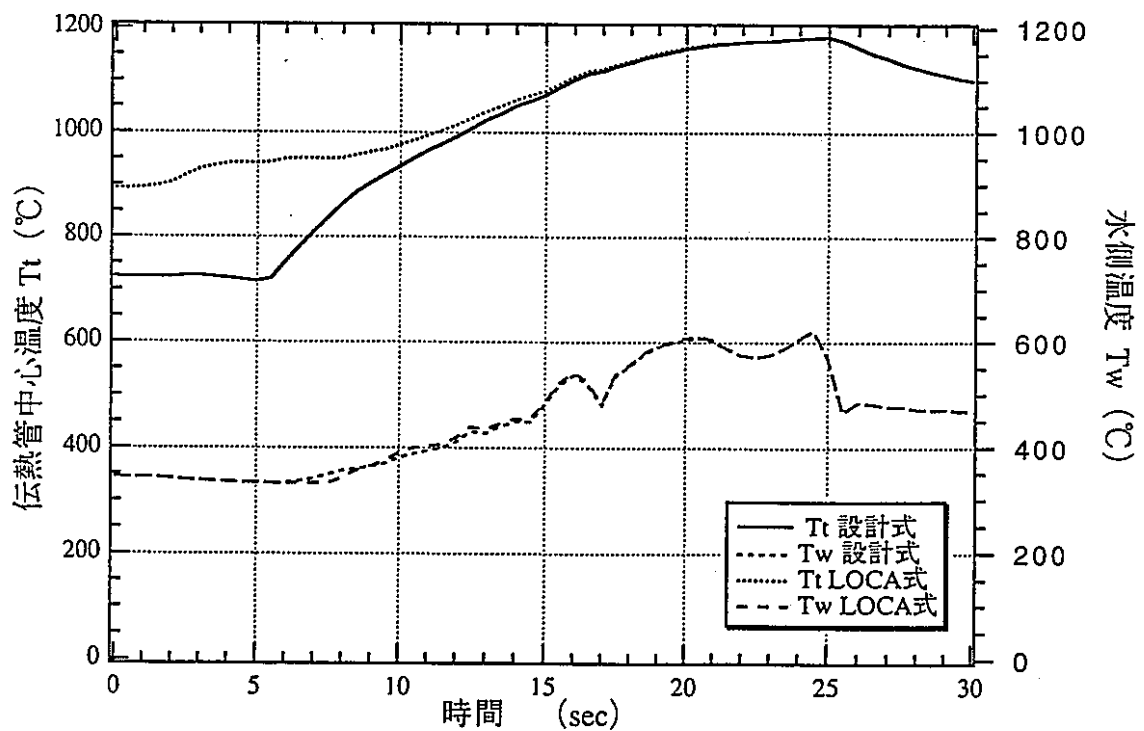


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (新モデル)

図3.4-2 伝熱管中心温度と水側温度 (EV リンク 8)

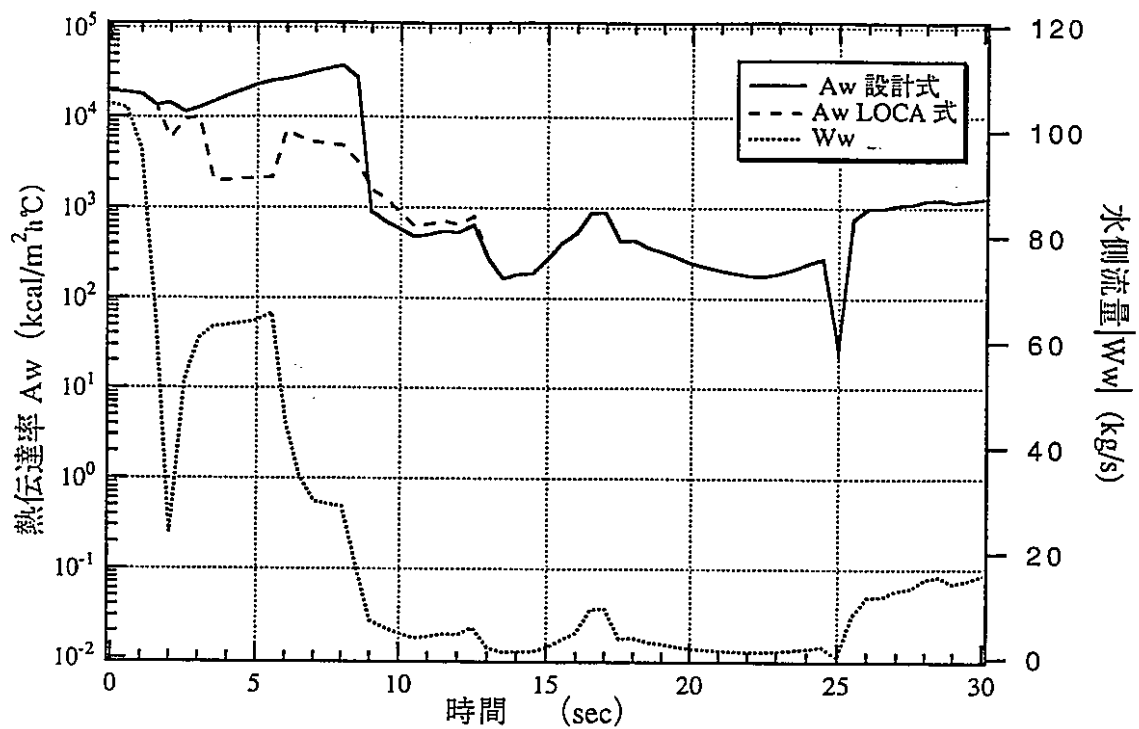


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (オリジナルモデル)

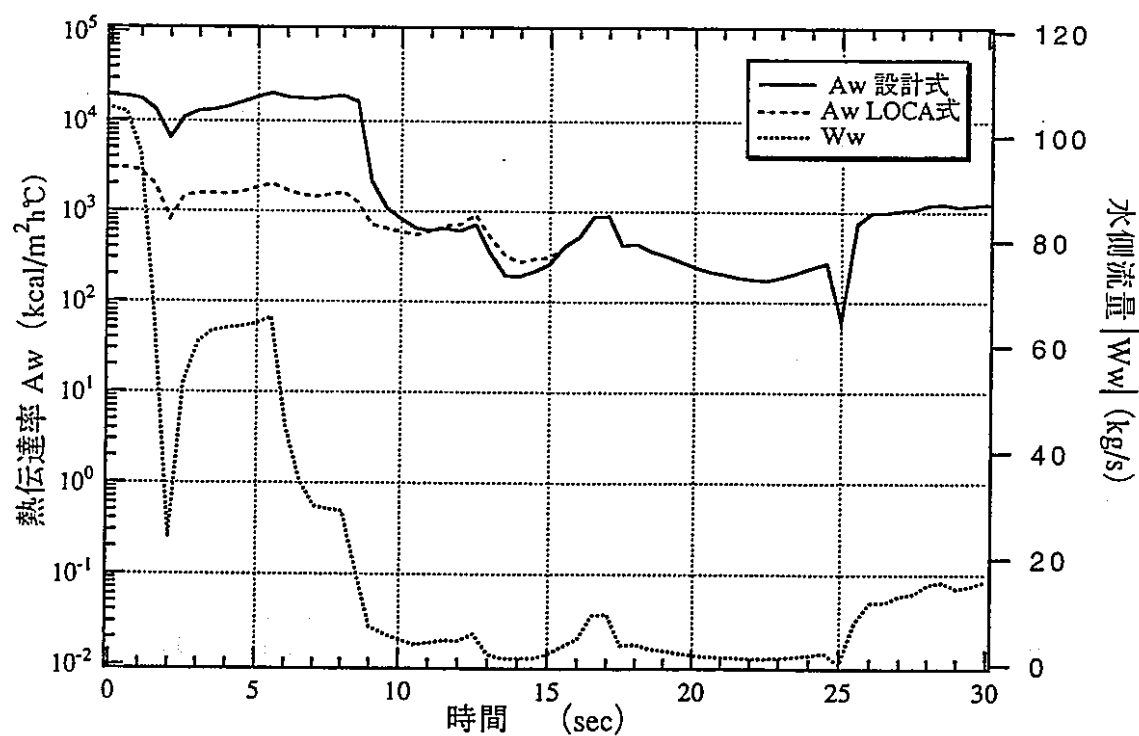


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (新モデル)

図3.4-3 伝熱管中心温度と水側温度 (EV リンク 9)



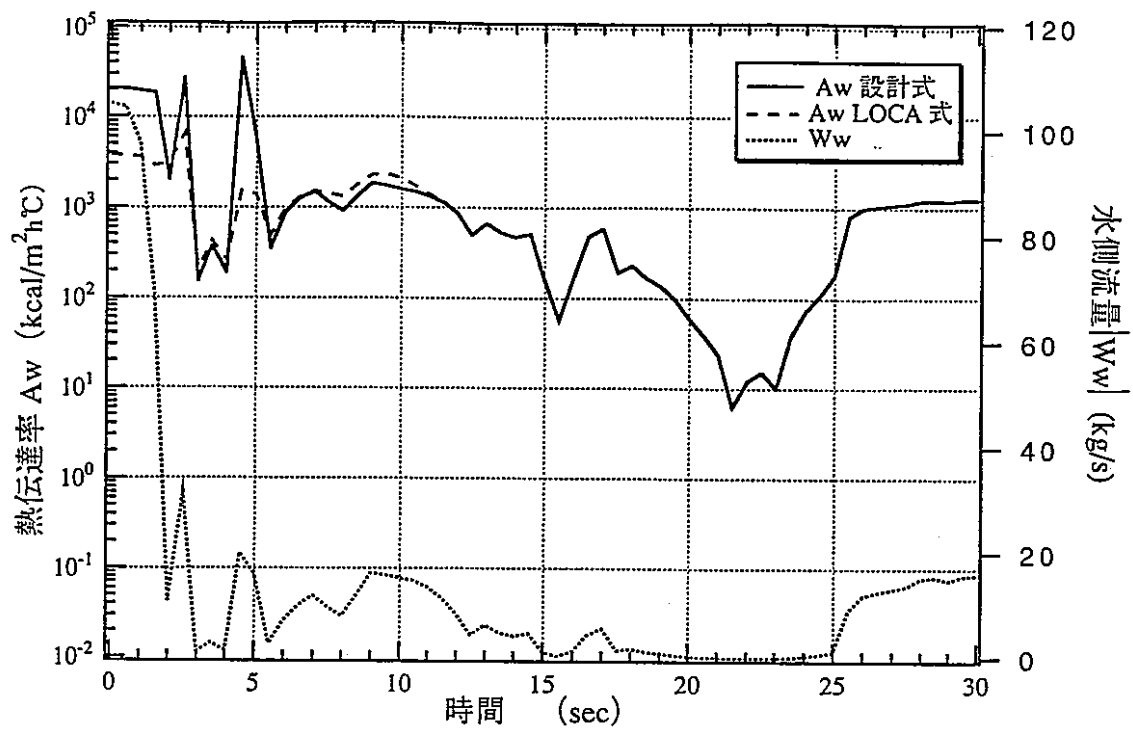
ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B) (オリジナルモデル)



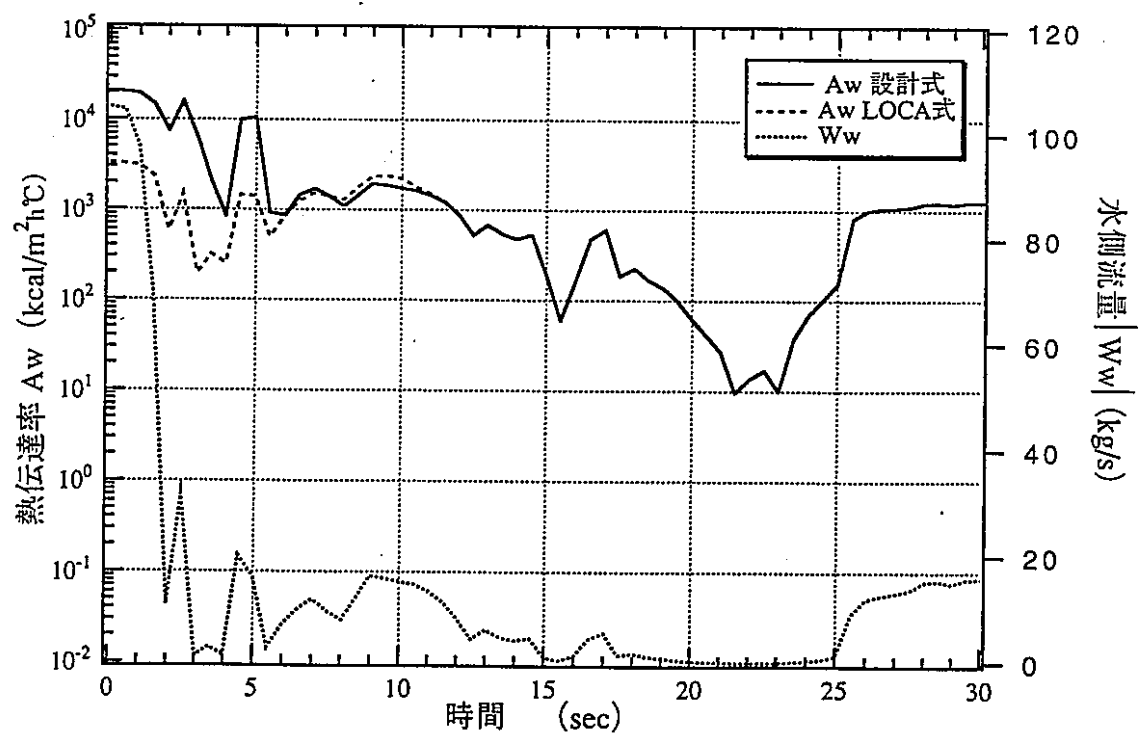
ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (新モデル)

図3.4-4 水側熱伝達率と流量 (EV リンク 6)



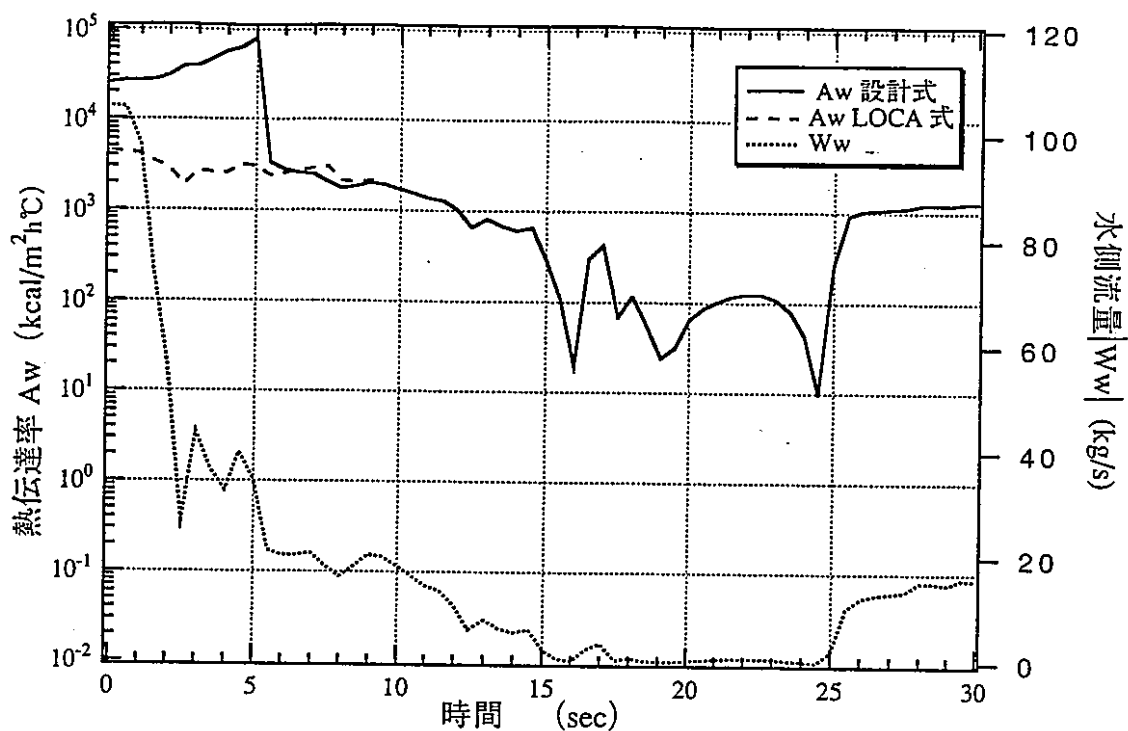


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B) (オリジナルモデル)

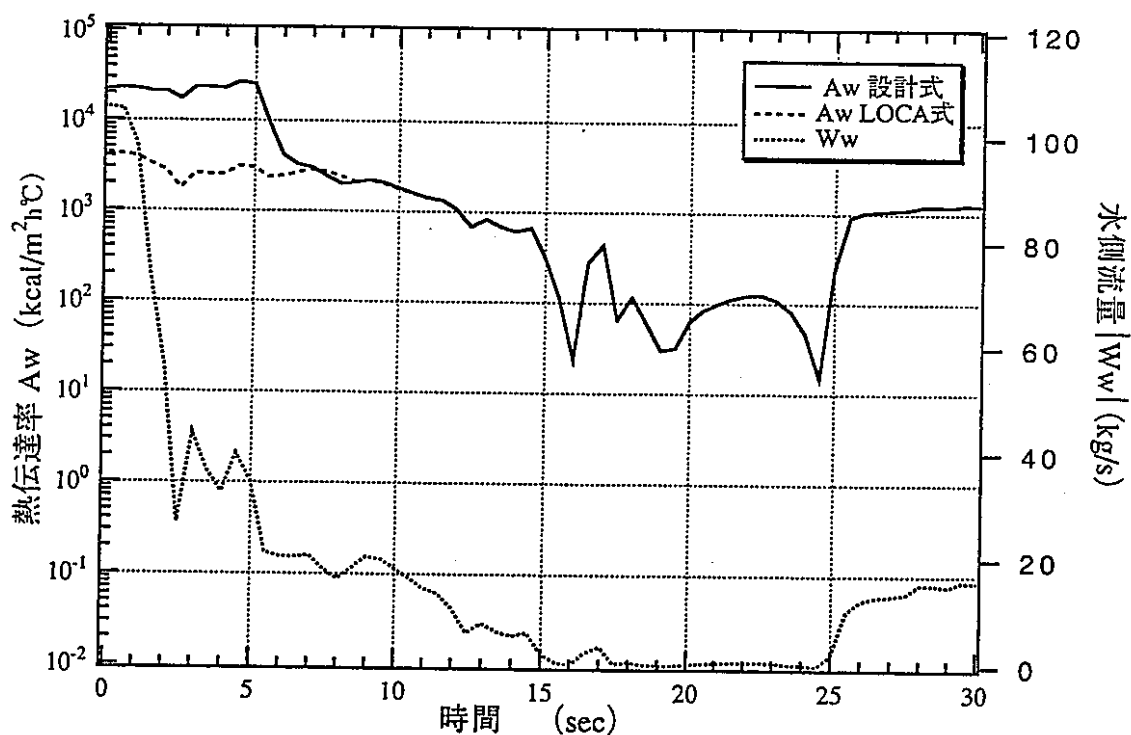


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B) (新モデル)

図3.4-5 水側熱伝達率と流量 (EVリンク 8)

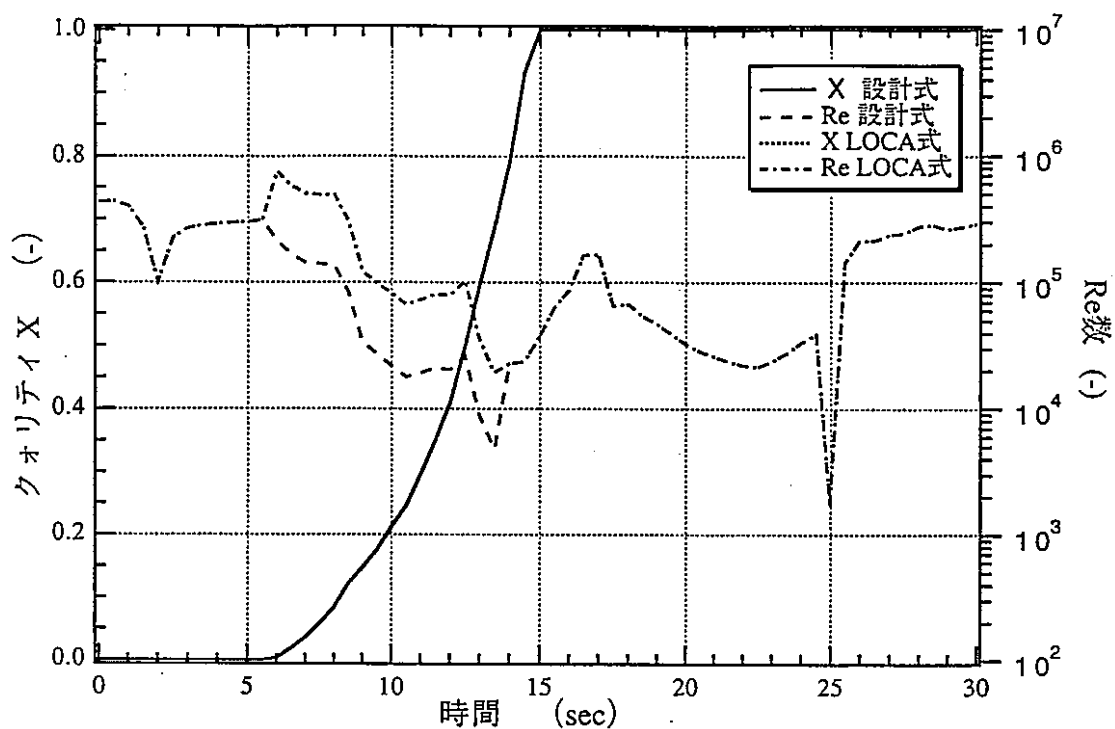


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B) (オリジナルモデル)

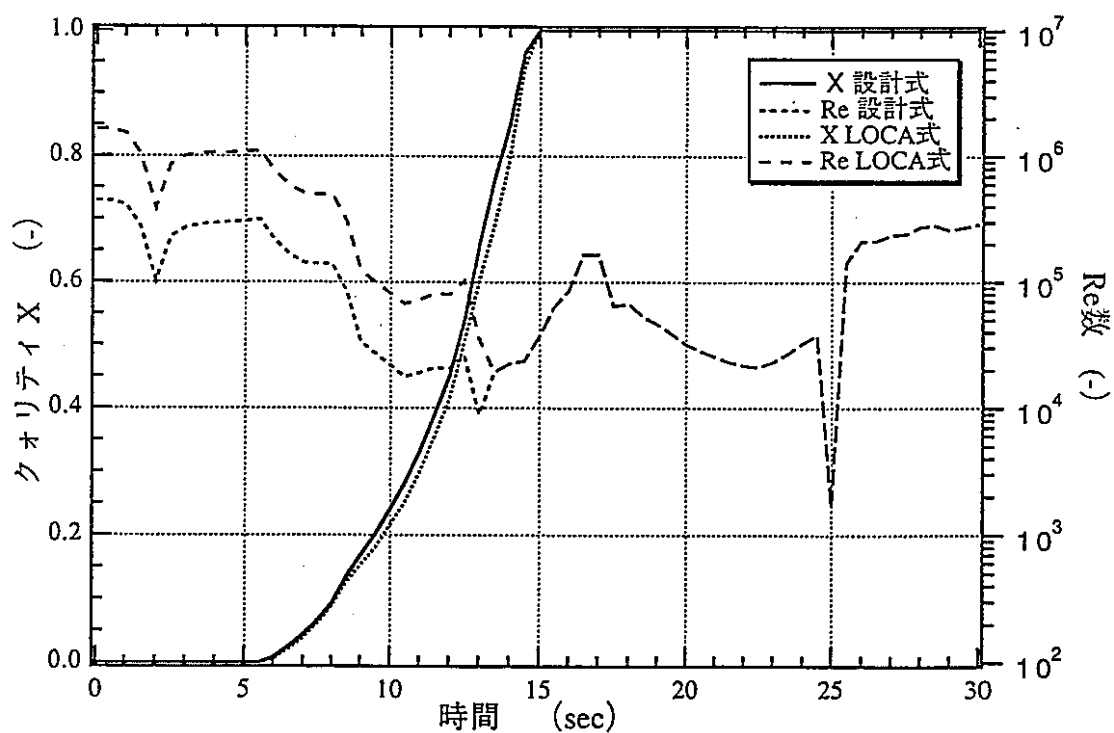


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (新モデル)

図3.4-6 水側熱伝達率と流量 (EV リンク 9)

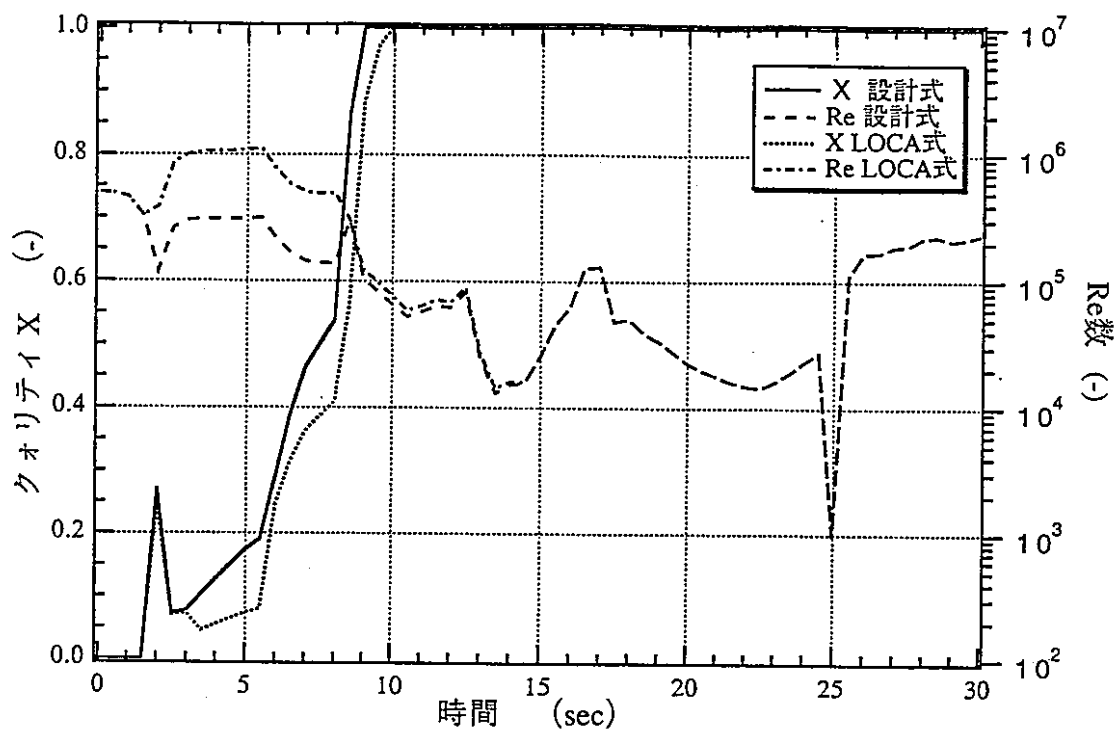


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B) (オリジナルモデル)

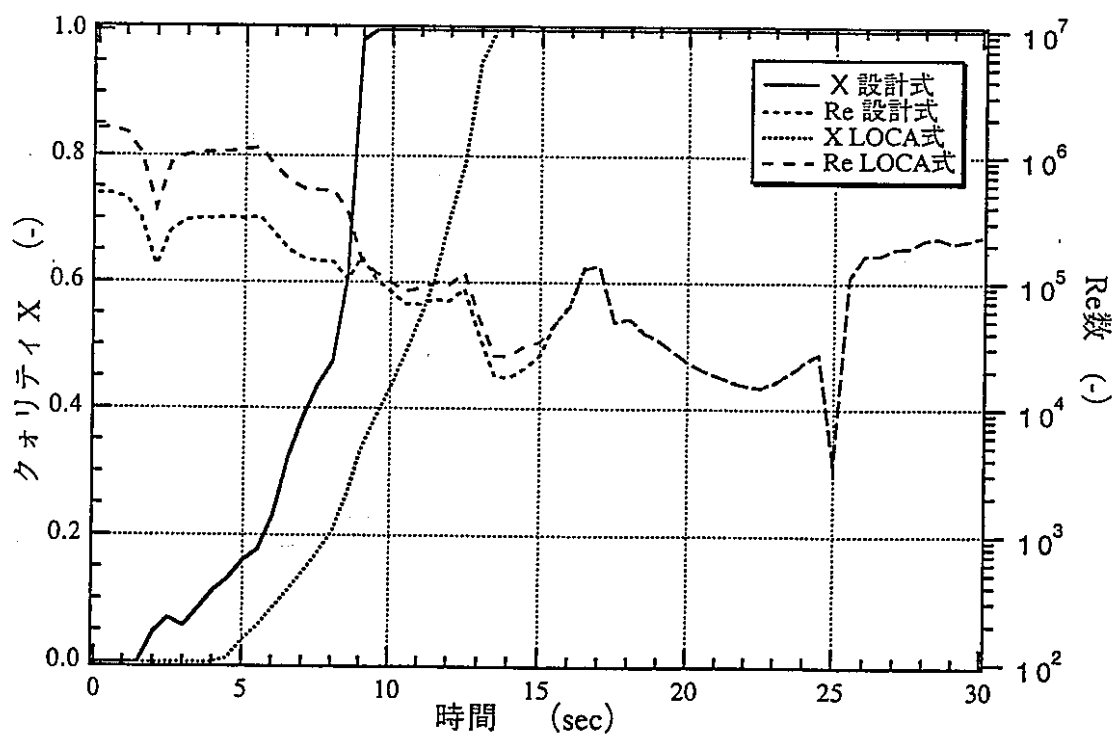


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B) (新モデル)

図3.4-7 クオリティと Re 数 入口ノード (EV リンク 6)

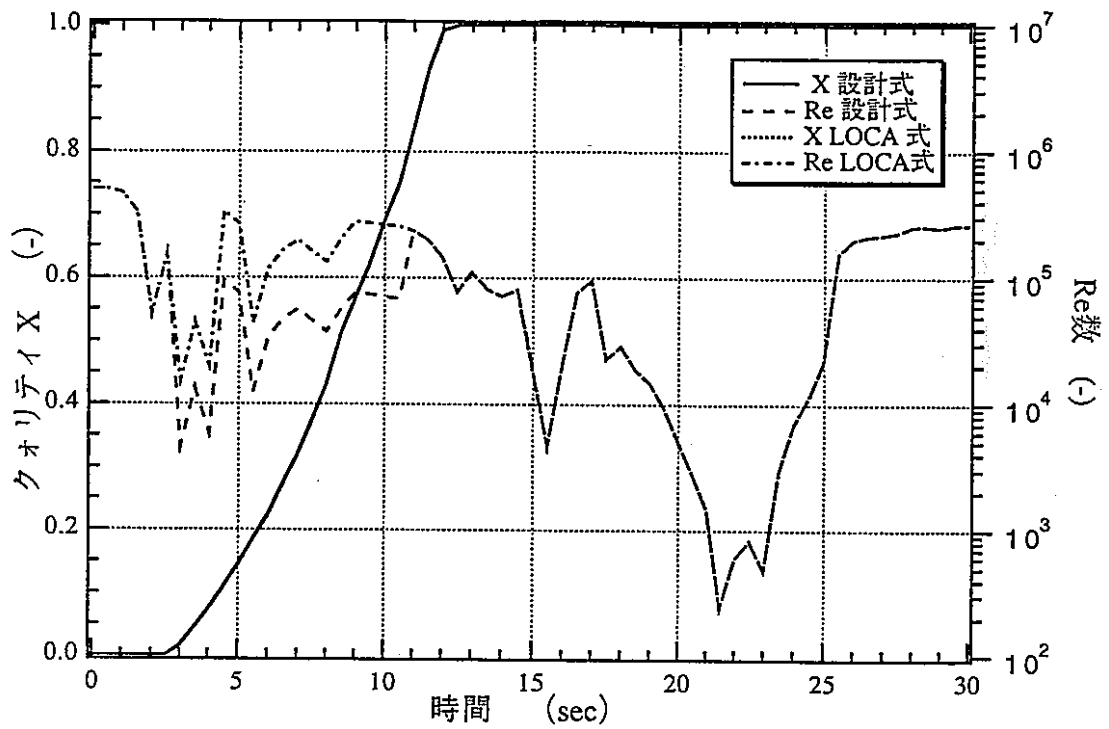


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B) (オリジナルモデル)

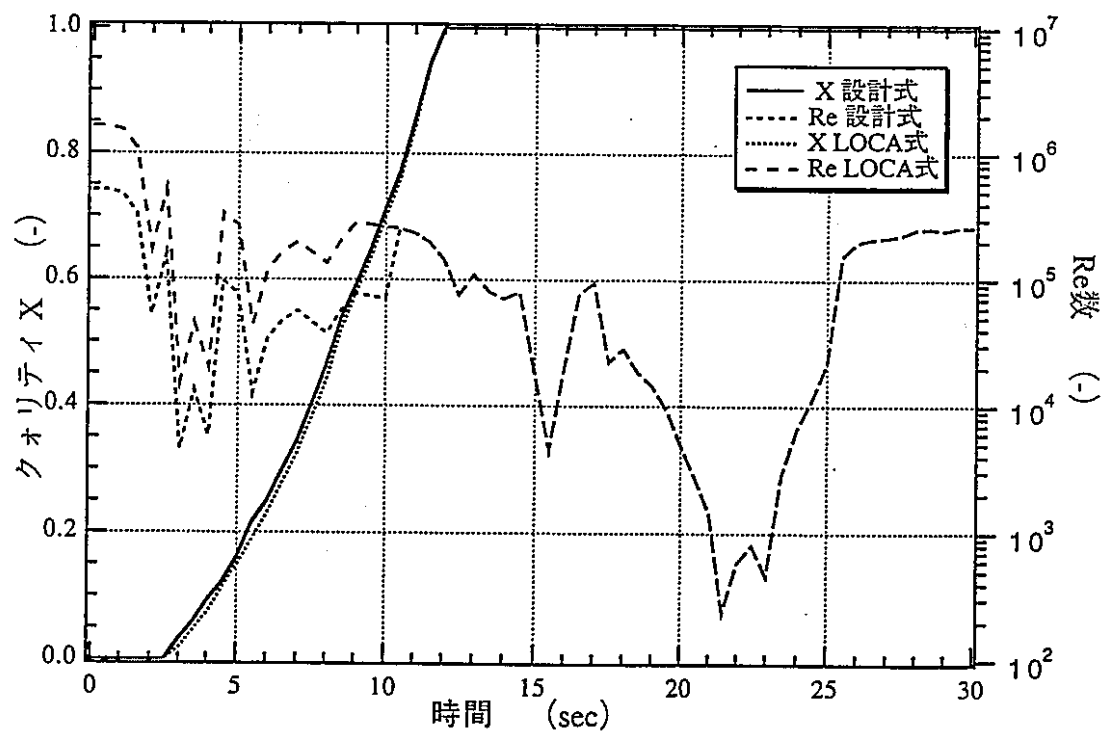


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B) (新モデル)

図3.4-8 クオリティと Re 数 出口ノード (EV リンク 6)

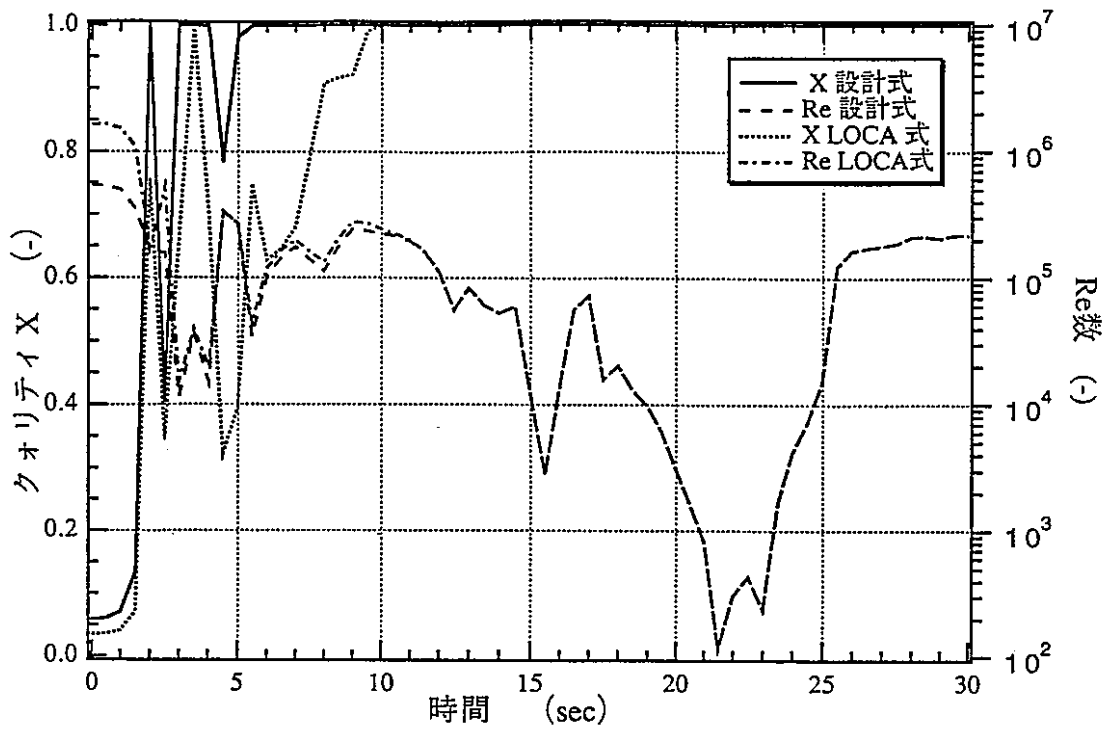


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (オリジナルモデル)

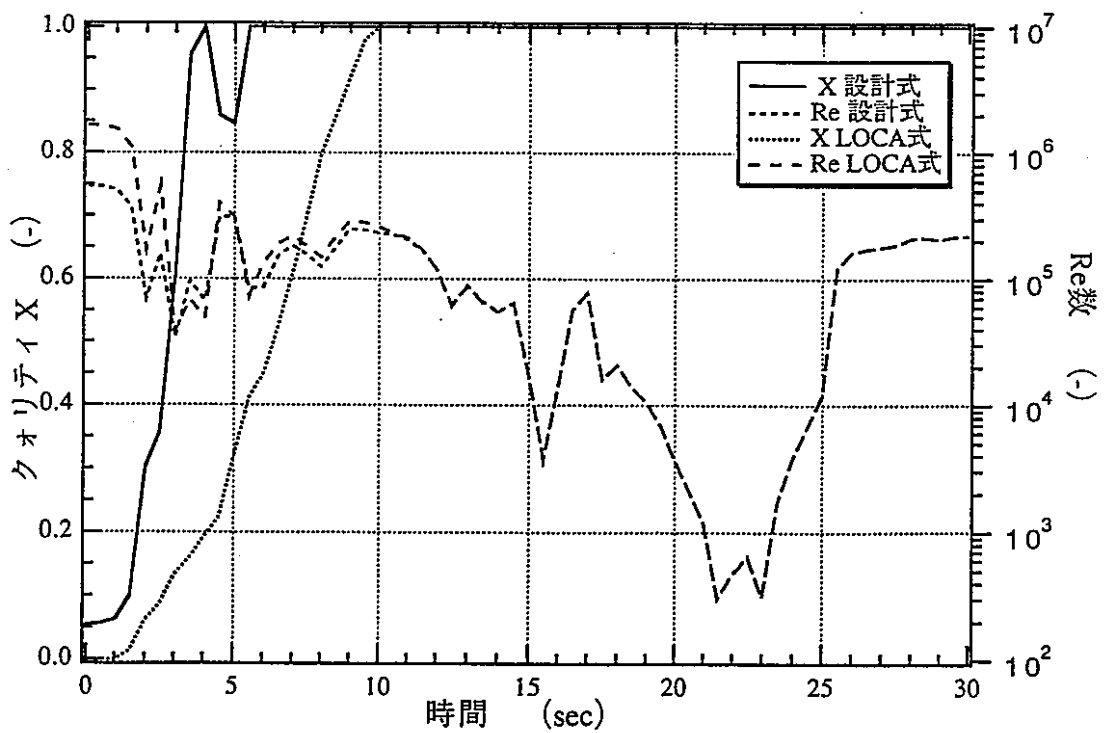


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (新モデル)

図3.4-9 クォリテイと Re 数 入口ノード (EV リンク 8)

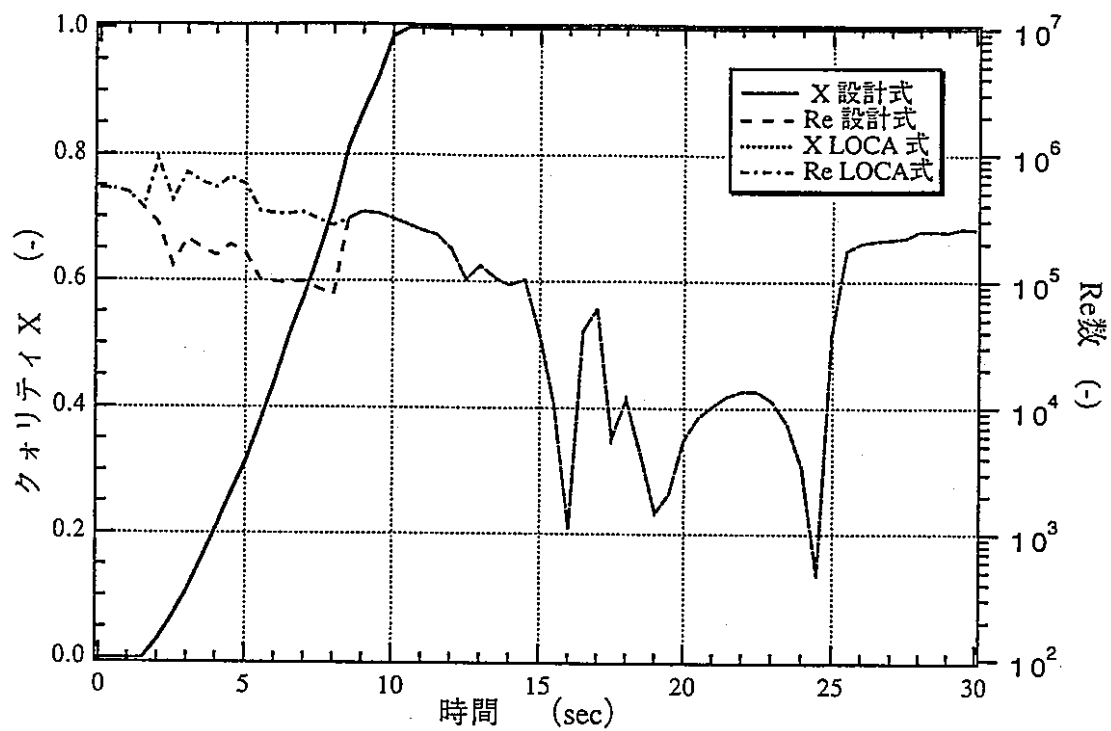


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (オリジナルモデル)

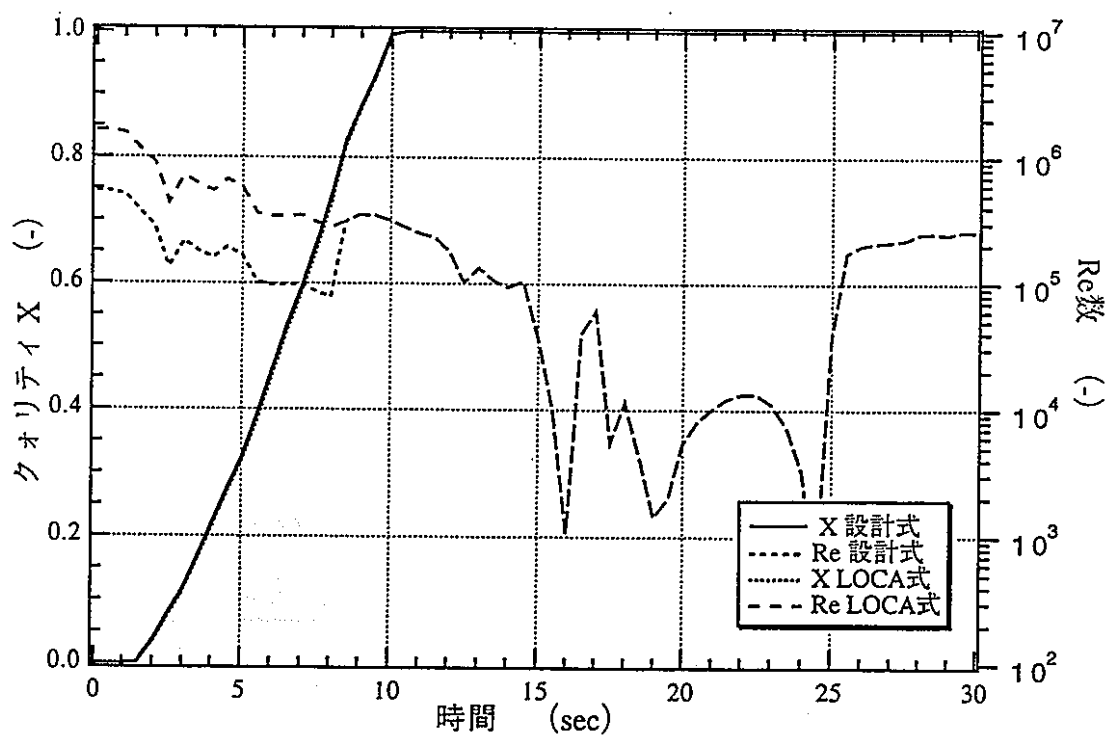


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (新モデル)

図3.4-10 クオリティと Re 数 出口ノード (EV リンク 8)

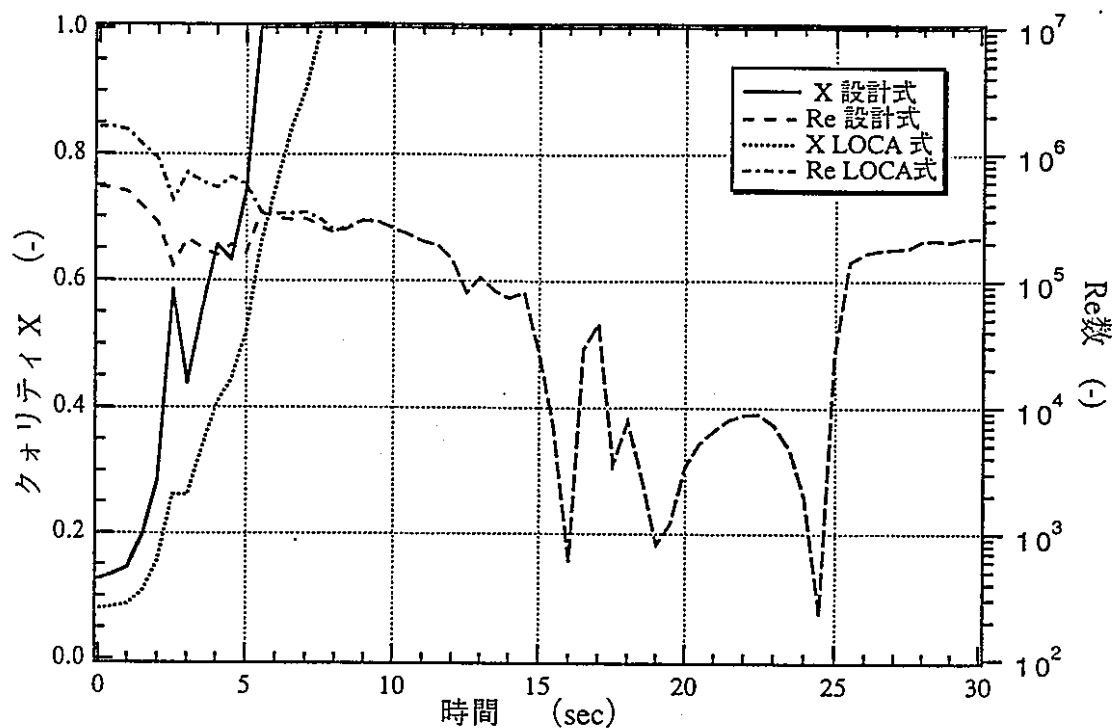


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (オリジナルモデル)

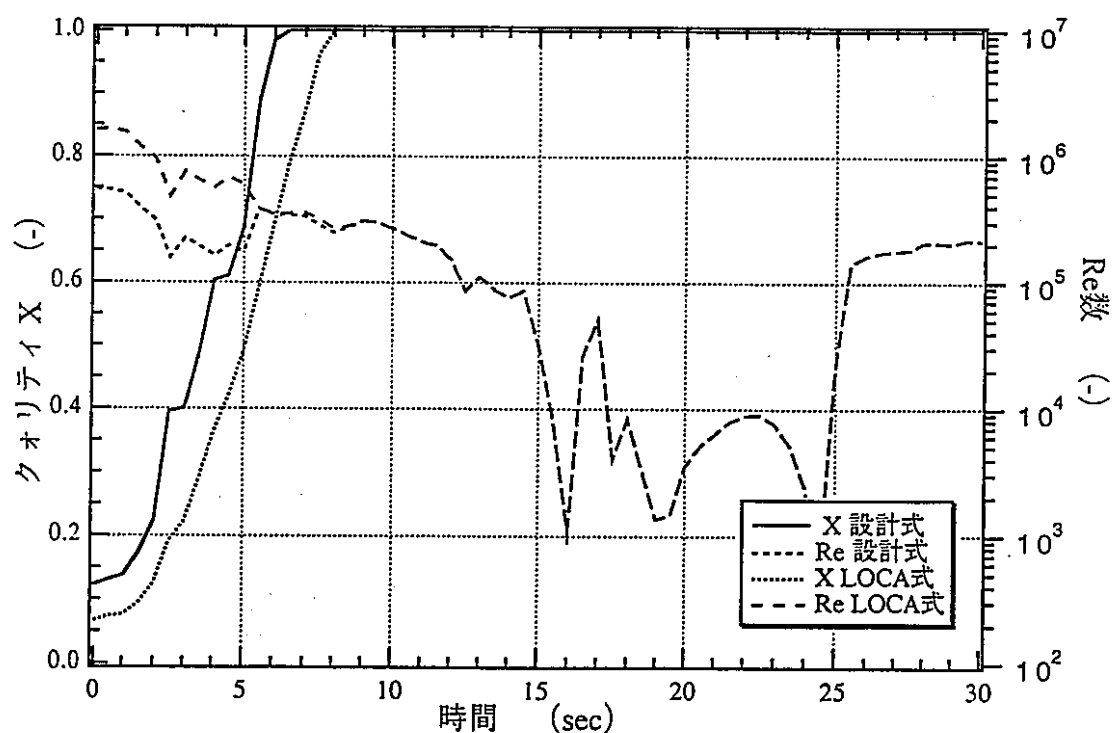


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (新モデル)

図3.4-11 クオリティと Re 数 入口ノード (EVリンク 9)



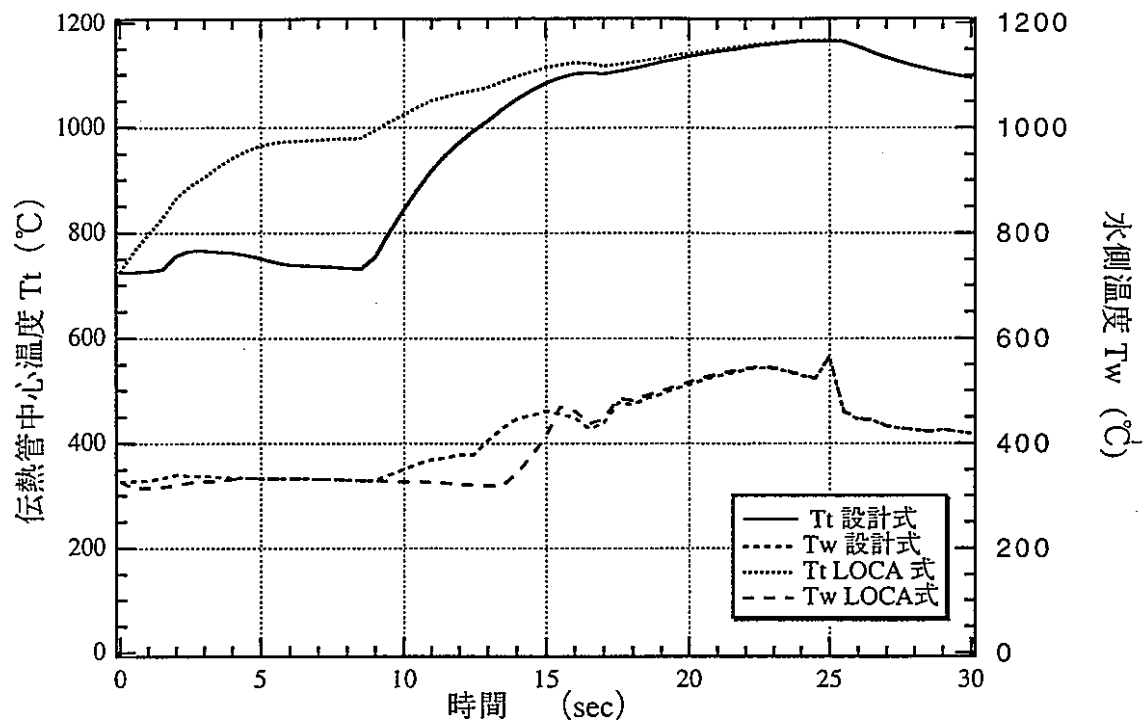
ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (オリジナルモデル)



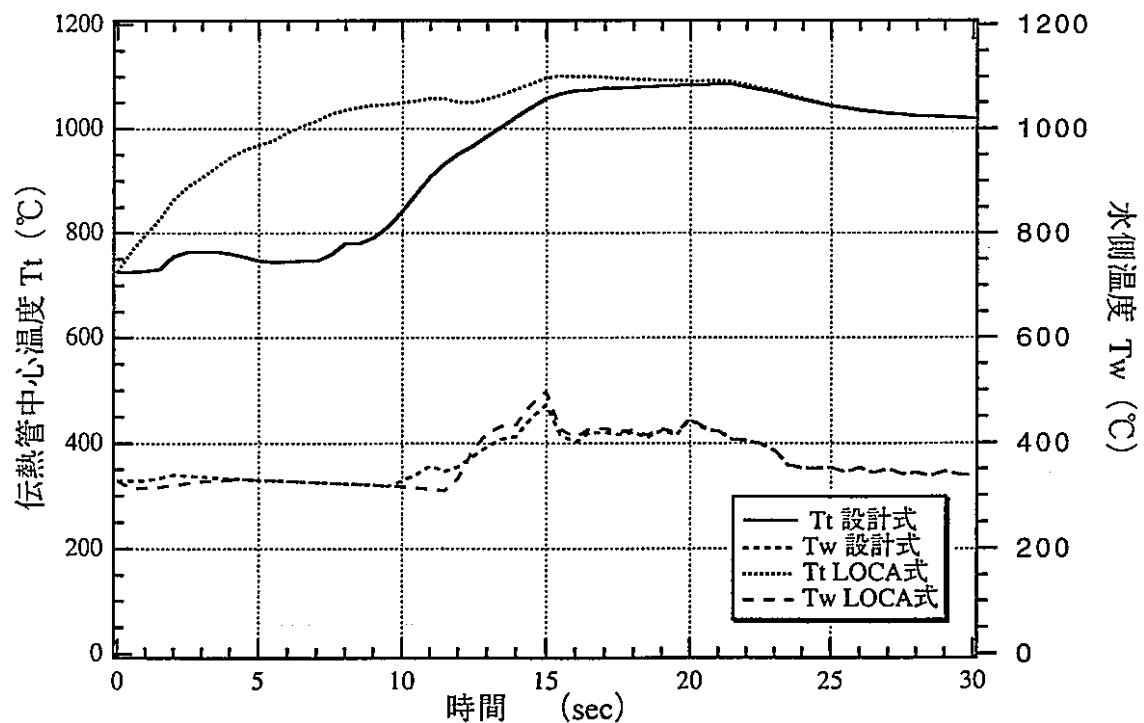
ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (新モデル)

図3.4-12 クオリティと Re 数 出口ノード (EV リンク 9)



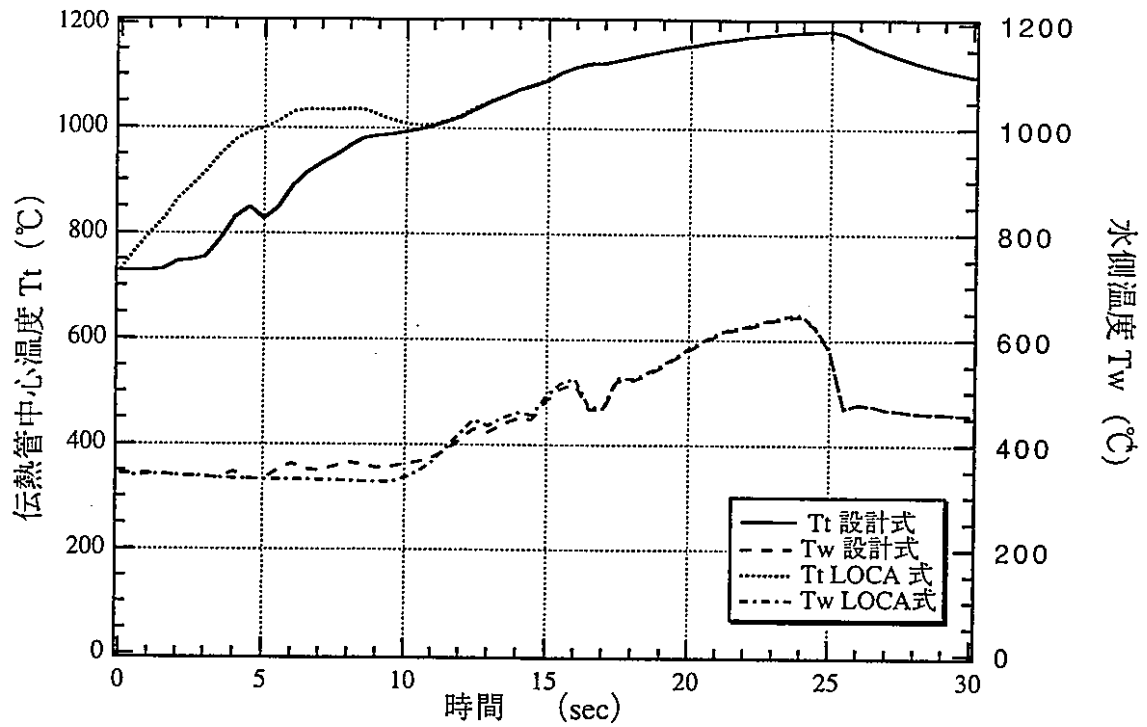


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

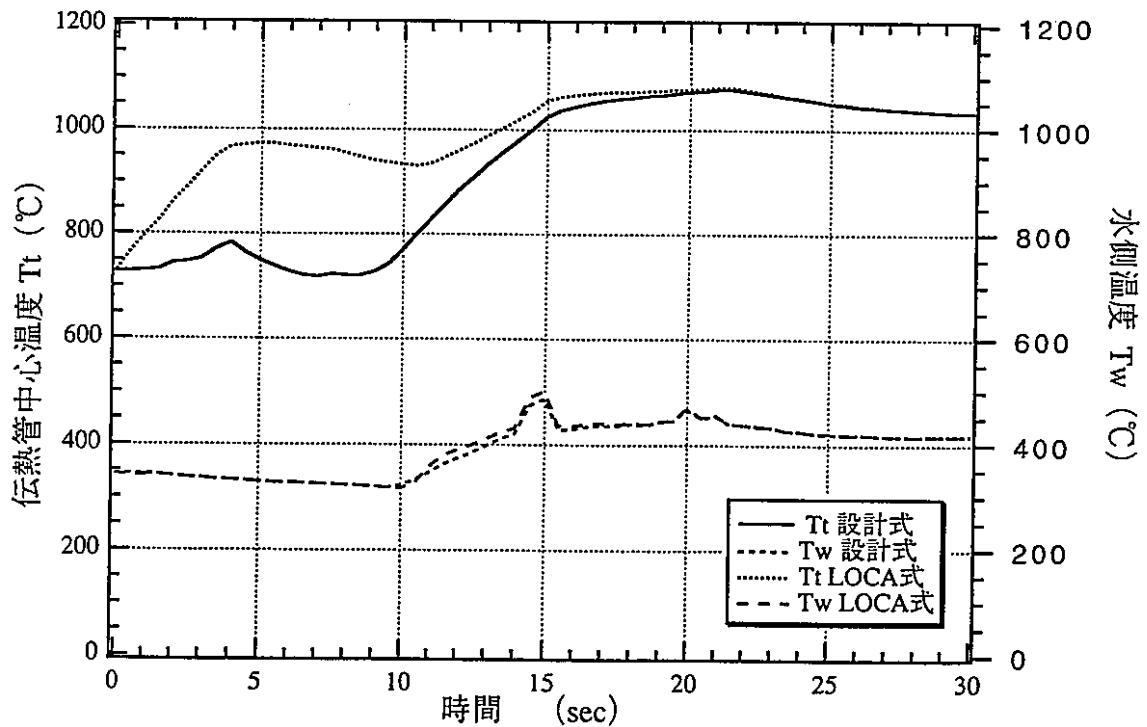


ケース2A (EV入口弁3B、EV出口弁 6B)

図3.4-13 伝熱管中心温度と水側温度 (EV リンク 6)

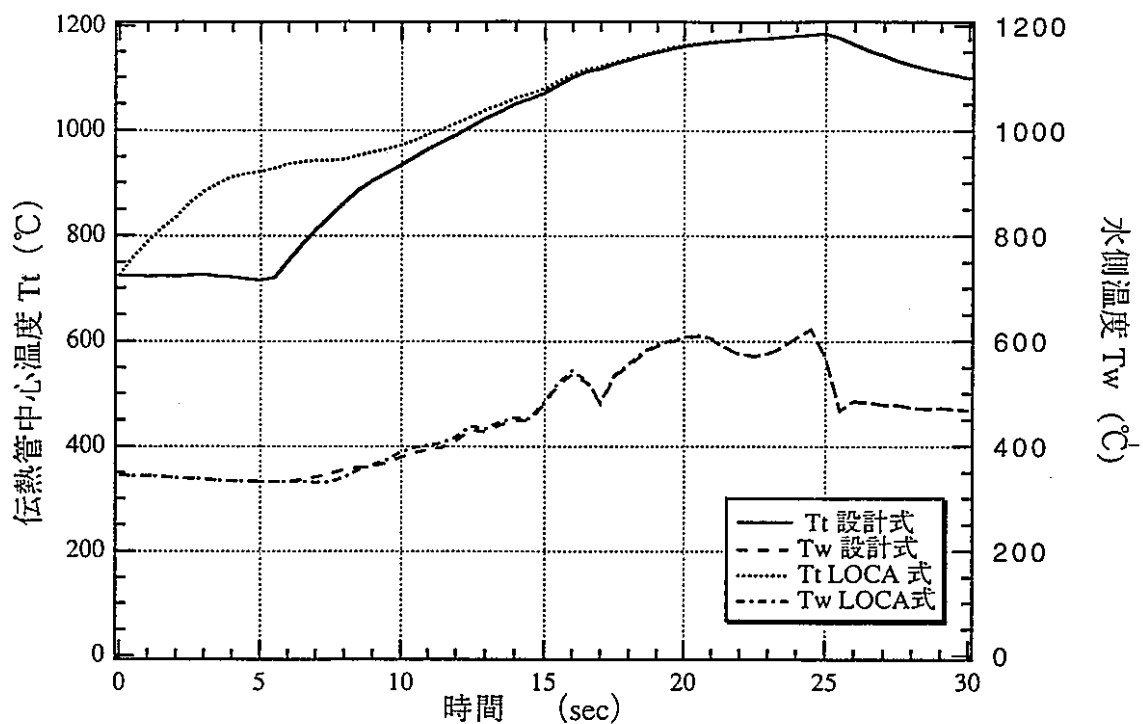


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

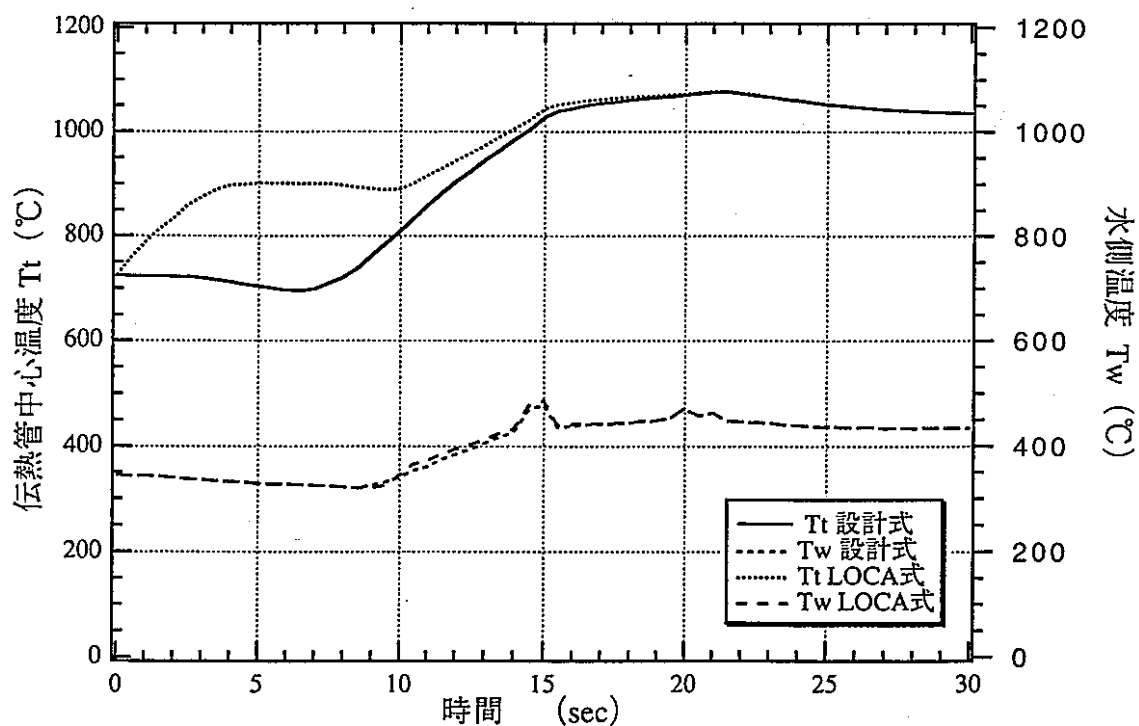


ケース2A (EV入口弁3B、EV出口弁 6B)

図3.4-14 伝熱管中心温度と水側温度 (EV リンク 8)

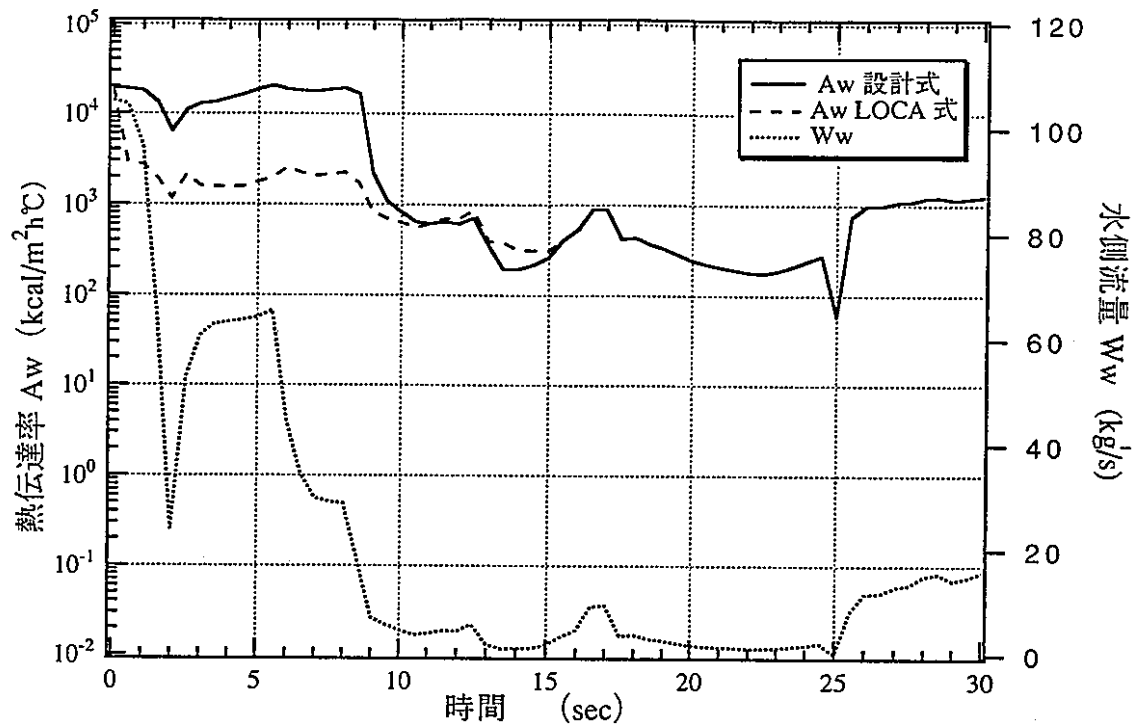


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

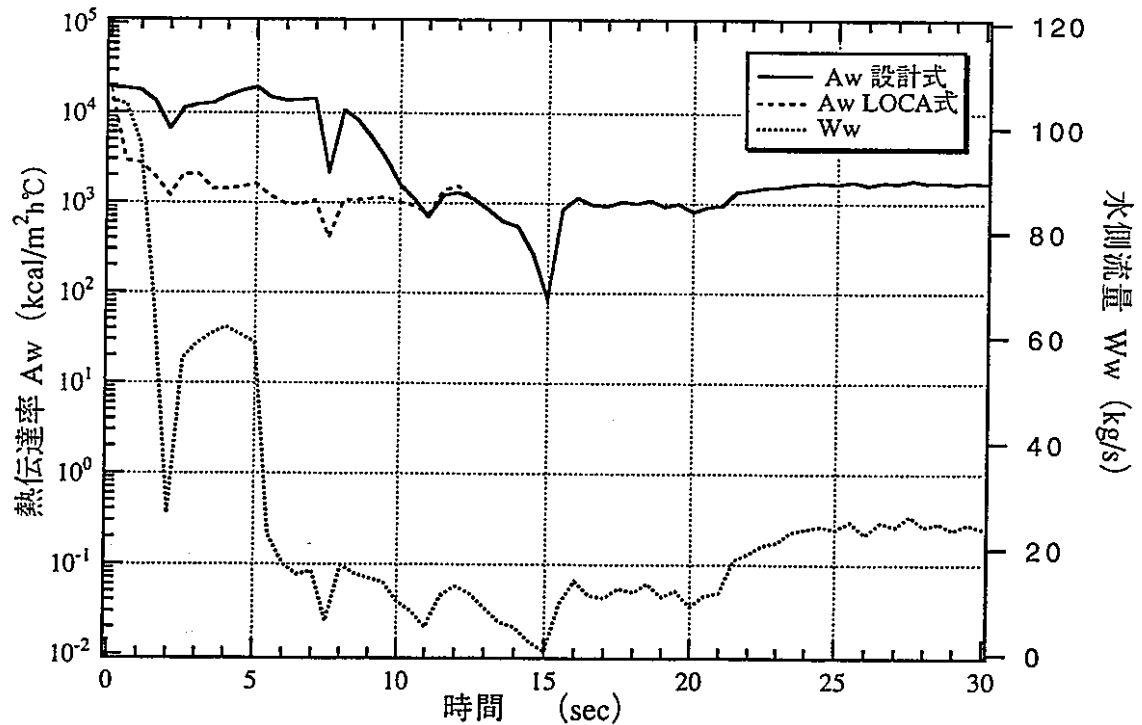


ケース2A (EV入口弁3B、EV出口弁 6B)

図3.4-15 伝熱管中心温度と水側温度 (EV リンク 9)

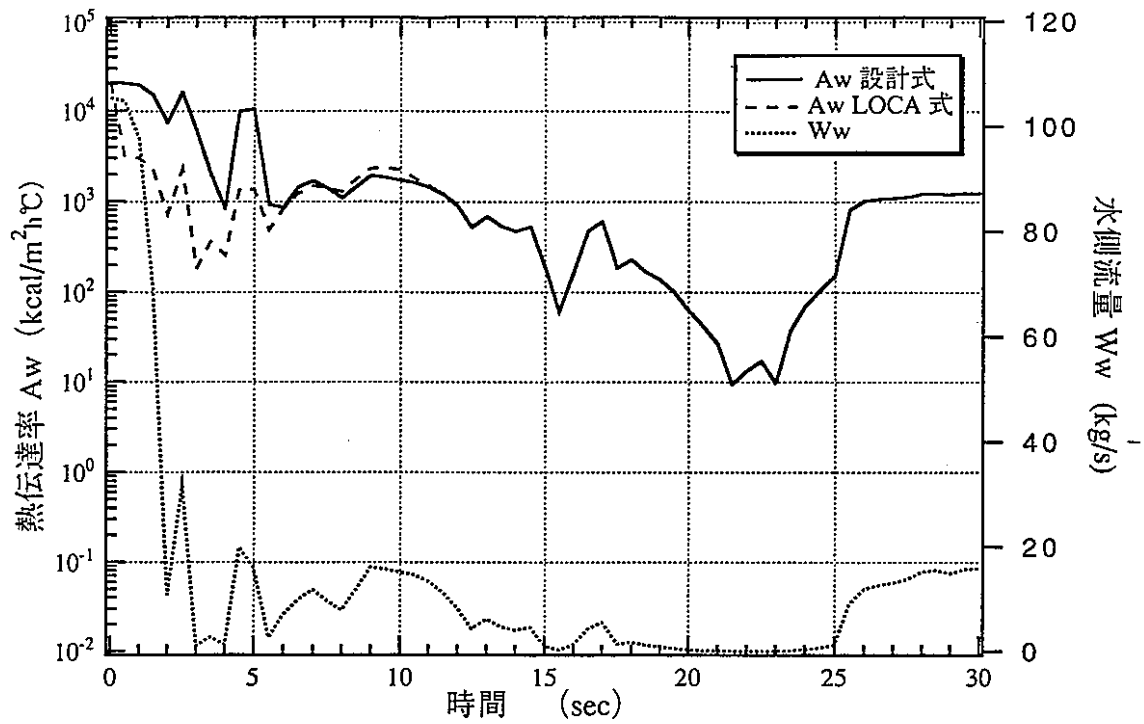


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

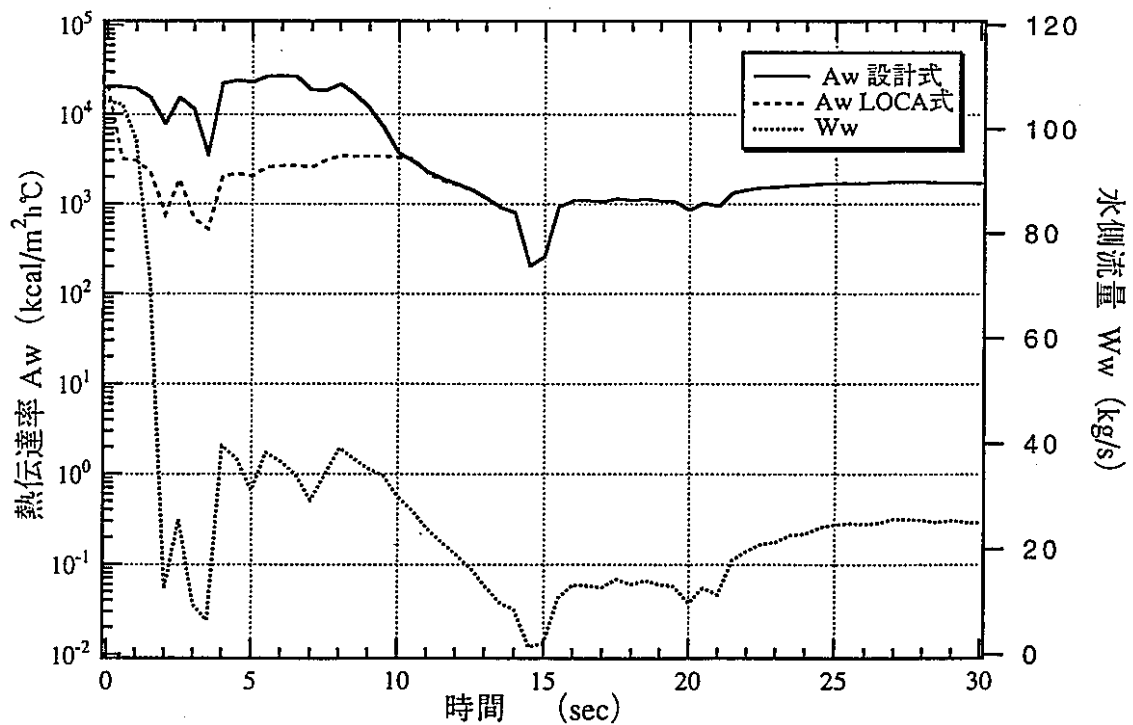


ケース2A (EV入口弁3B、EV出口弁6B)

図3.4-16 水側熱伝達率と流量 (EVリンク 6)

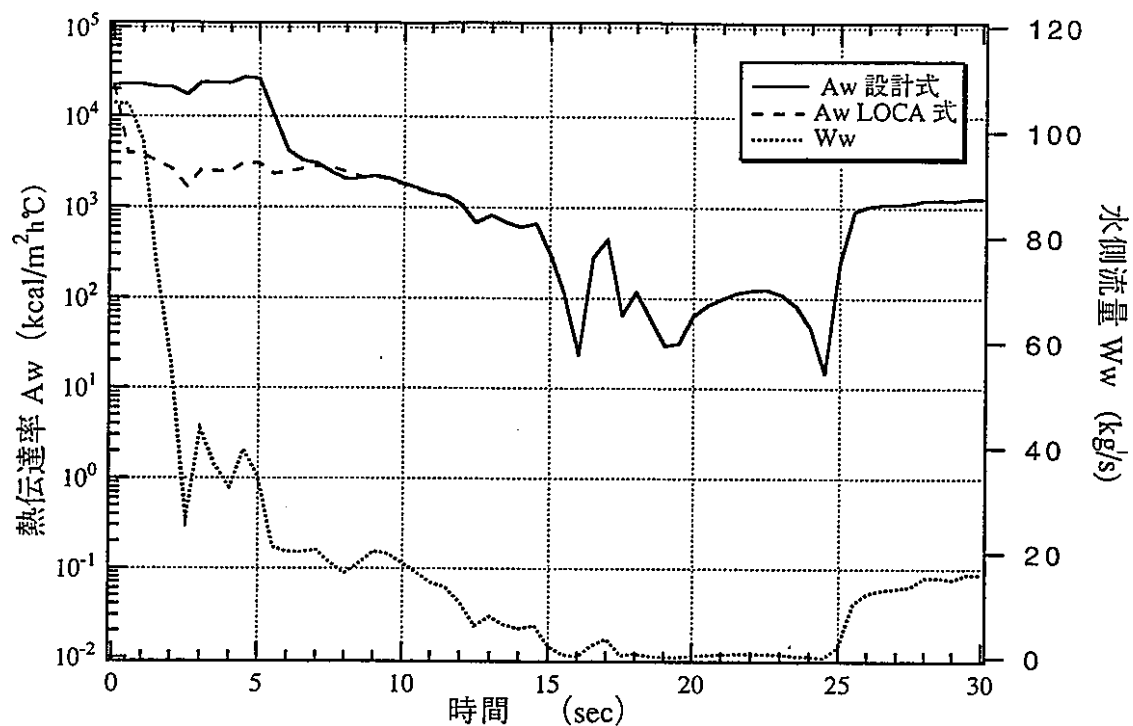


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

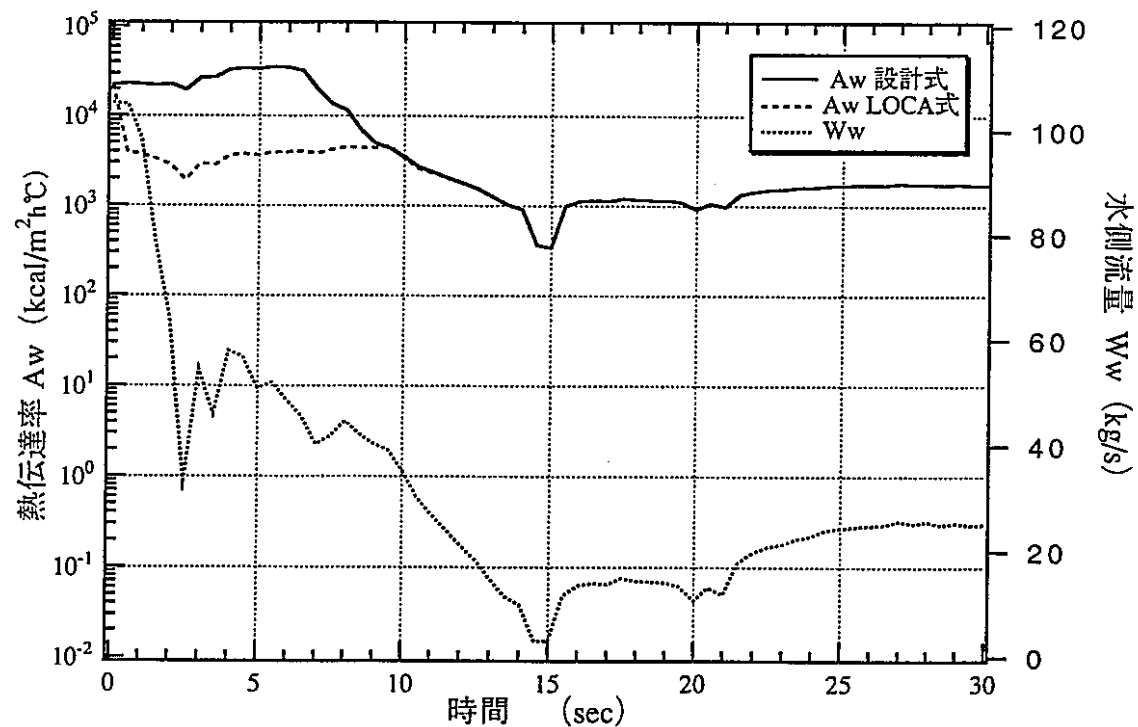


ケース2A (EV入口弁3B、EV出口弁6B)

図3.4-17 水側熱伝達率と流量 (EVリンク 8)

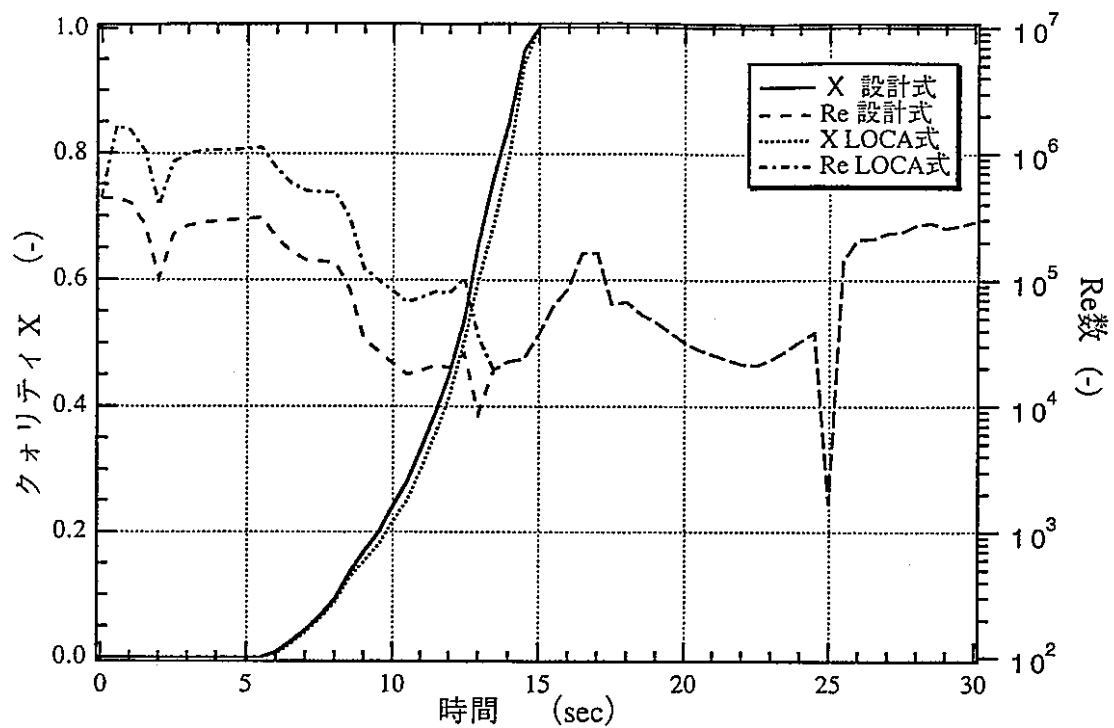


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

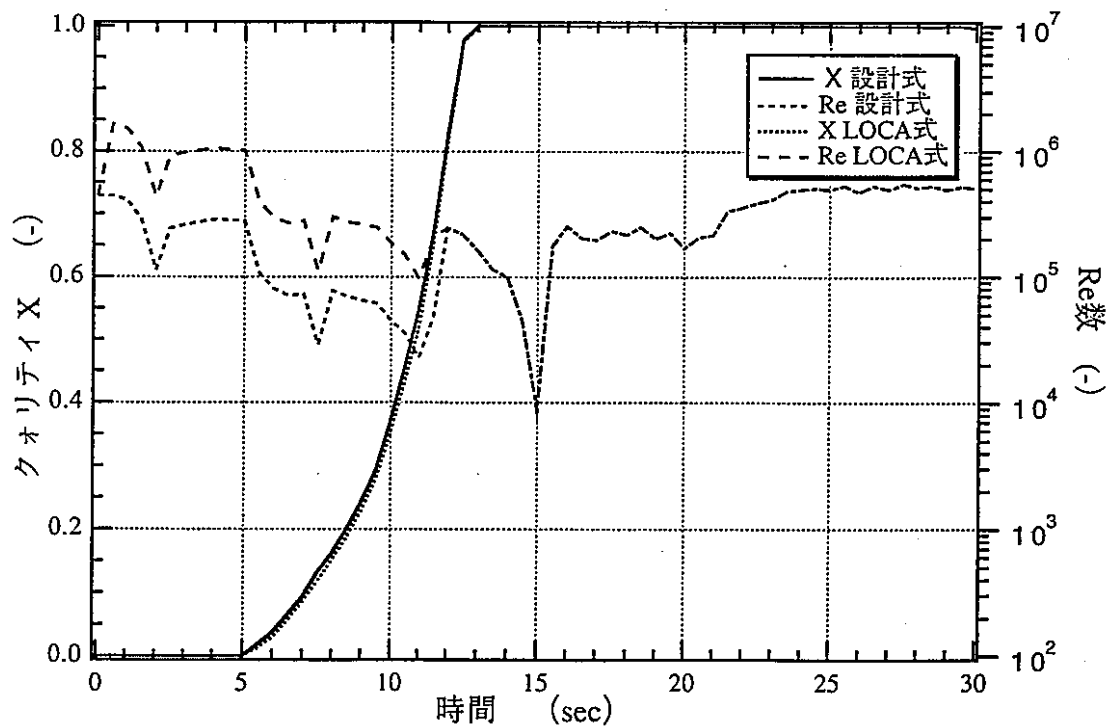


ケース2A (EV入口弁3B、EV出口弁 6B)

図3.4-18 水側熱伝達率と流量 (EVリンク 9)

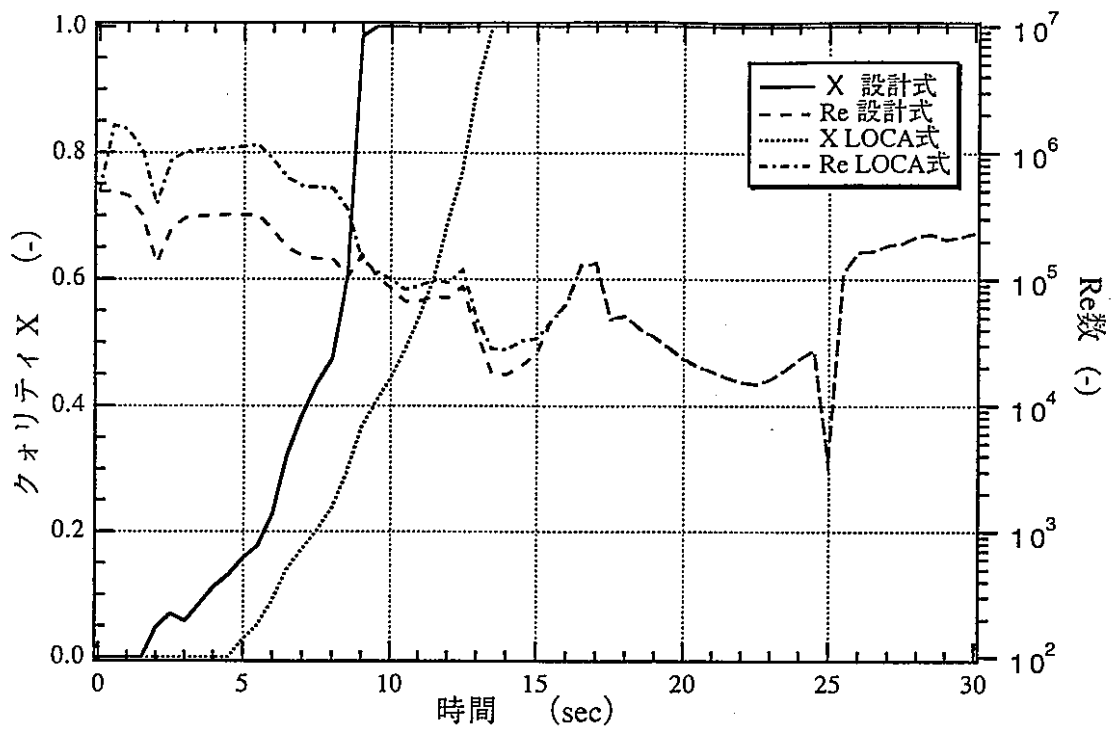


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

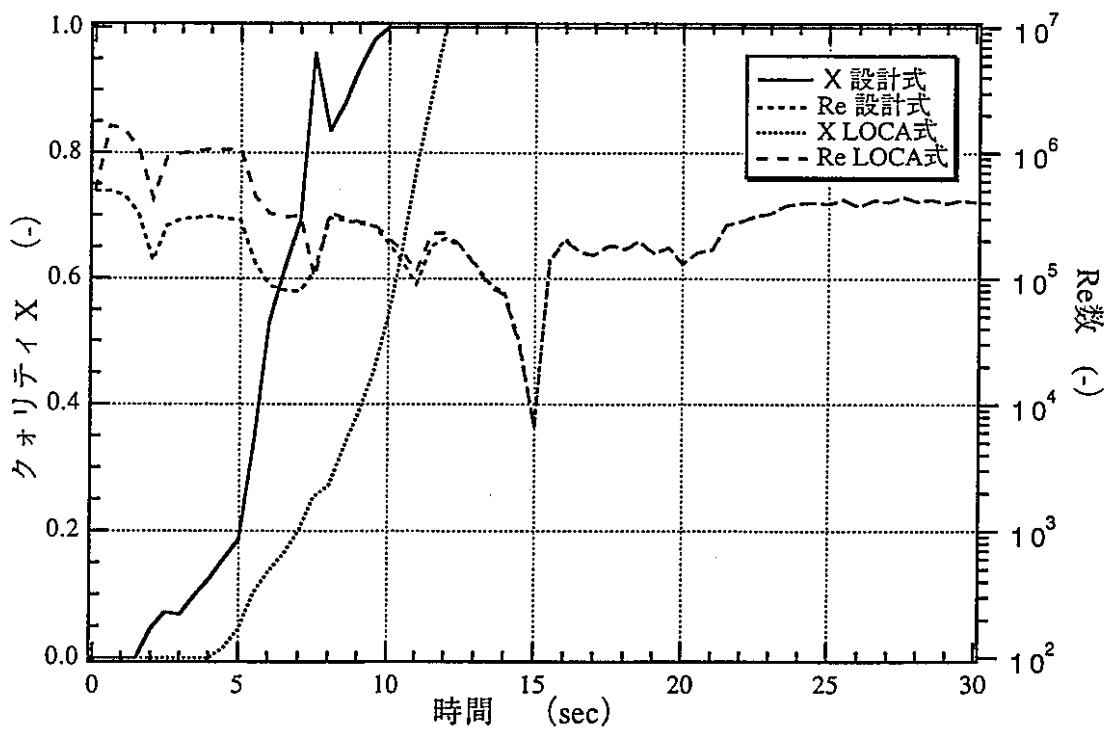


ケース2A (EV入口弁3B、EV出口弁6B)

図3.4-19 クォリテイと Re 数 入口ノード (EV リンク 6)



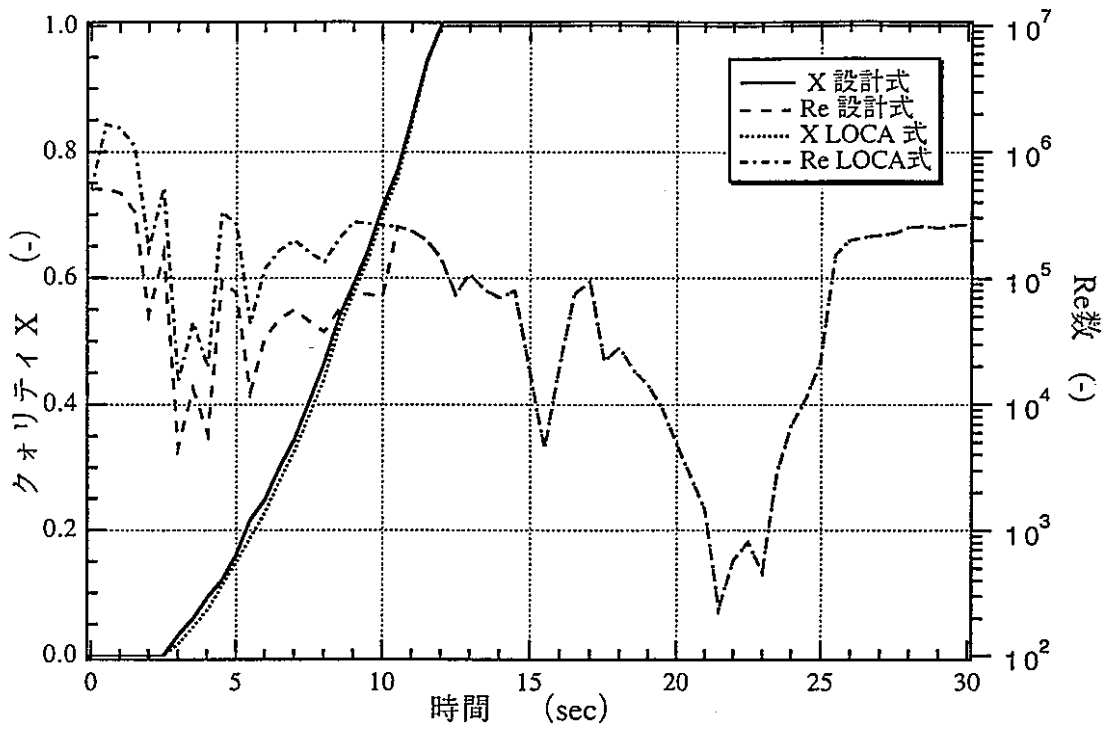
ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)



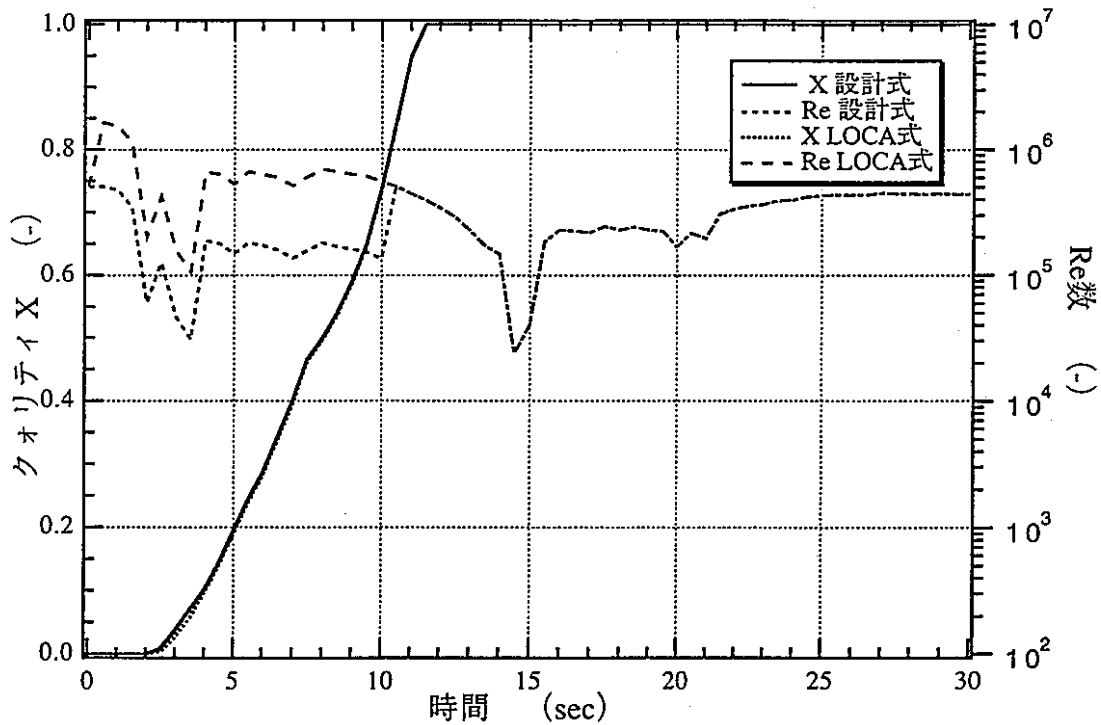
ケース2A (EV入口弁3B、EV出口弁6B)

図3.4-20 クオリティと Re 数 出口ノード (EV リンク 6)



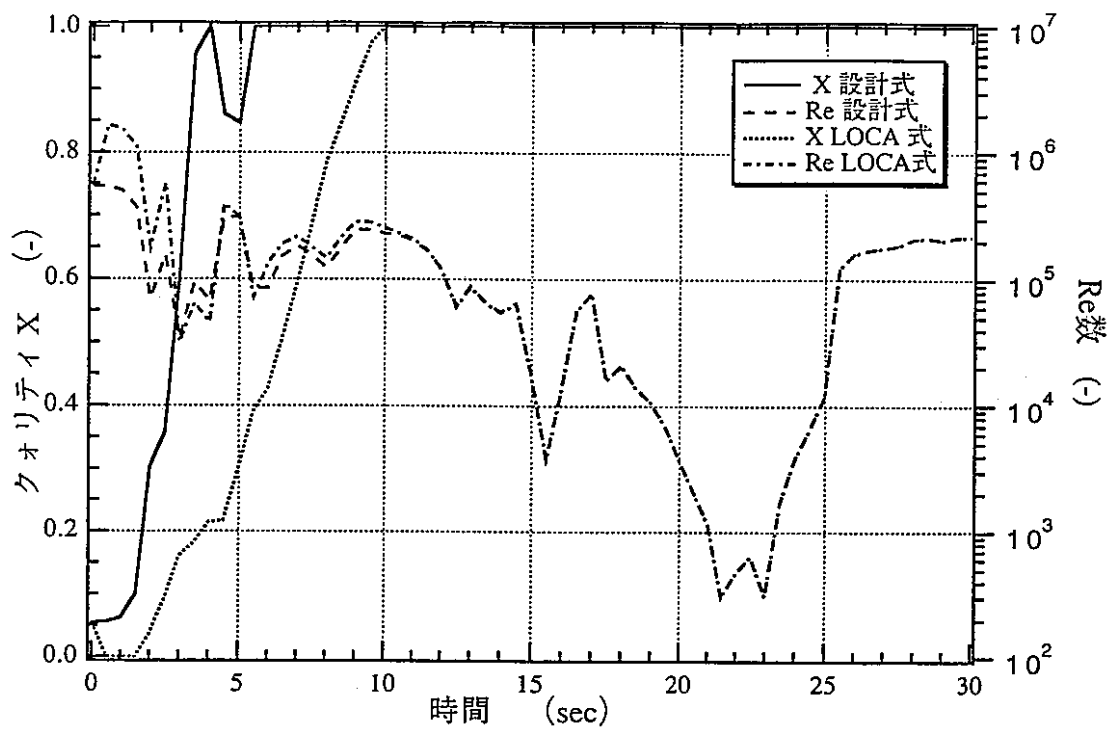


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

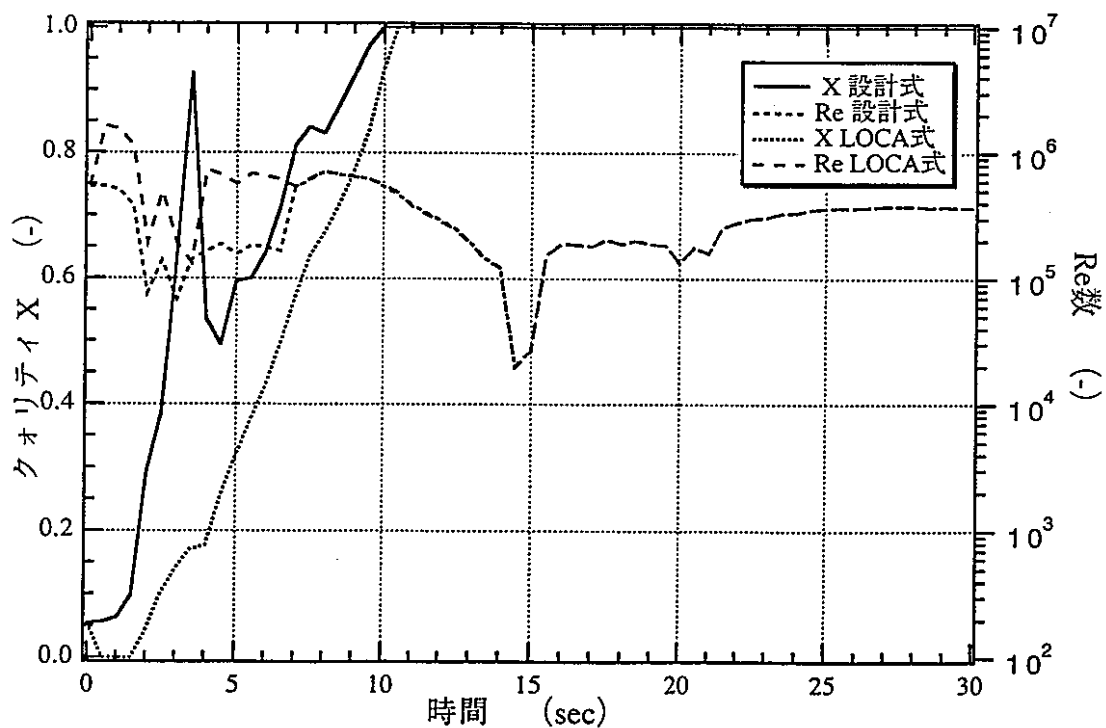


ケース2A (EV入口弁3B、EV出口弁 6B)

図3.4-21 クオリティと Re 数 入口ノード (EVリンク 8)

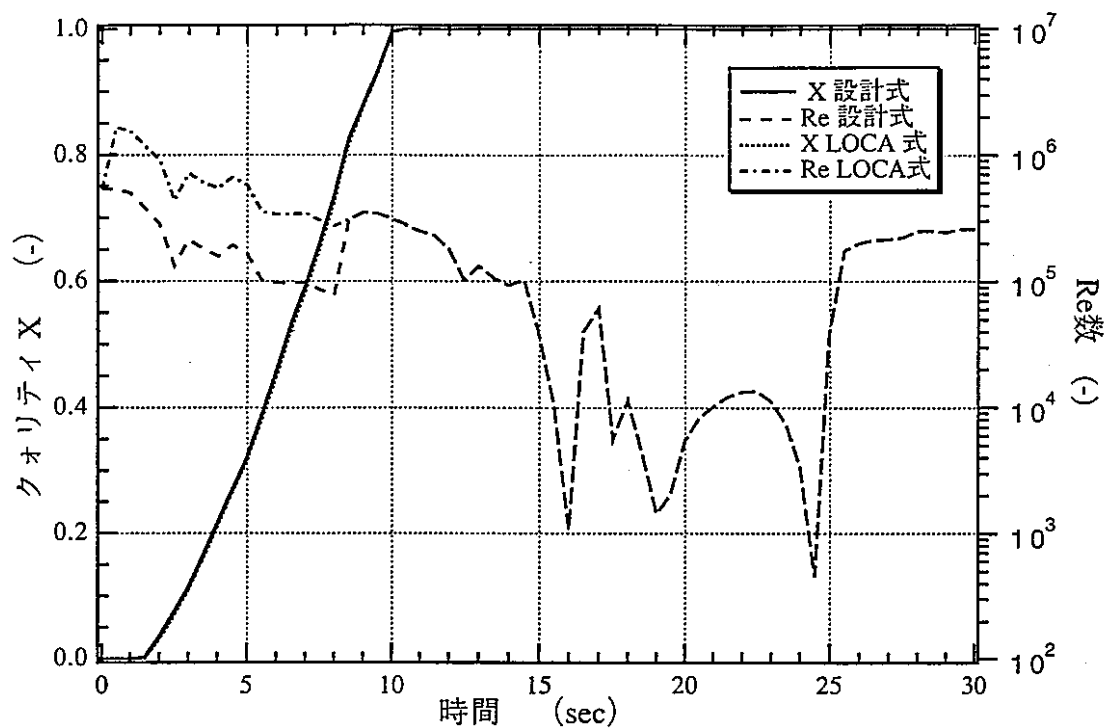


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

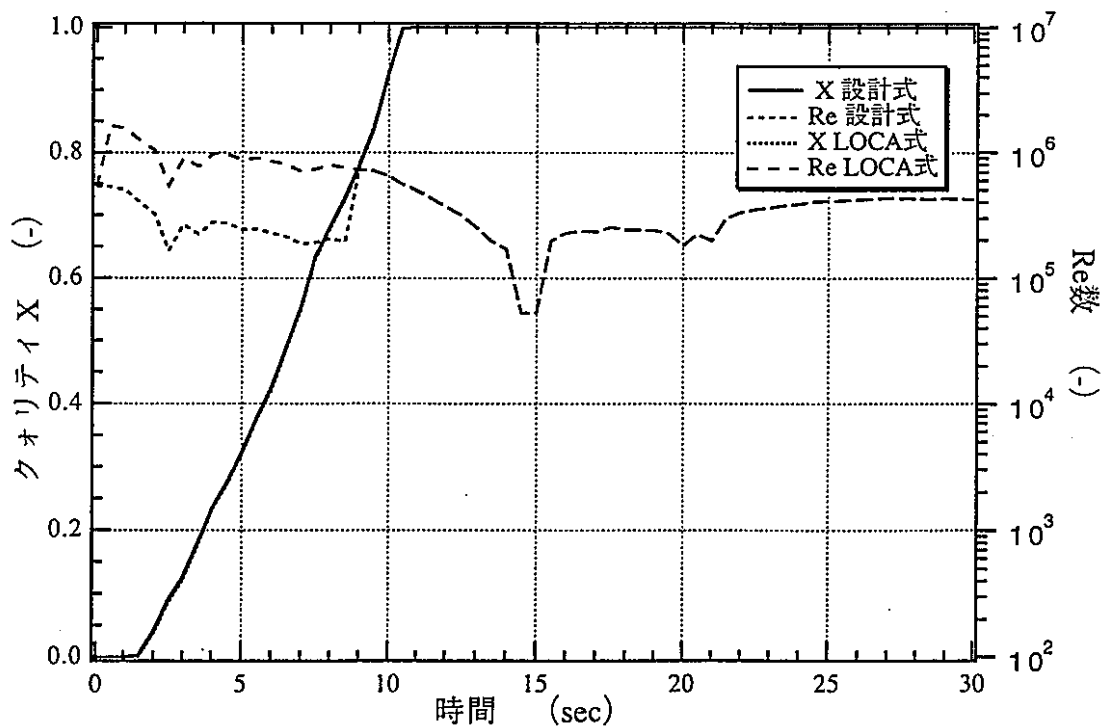


ケース2A (EV入口弁3B、EV出口弁 6B)

図3.4-22 クオリティと  $Re$  数 出口ノード (EVリンク 8)

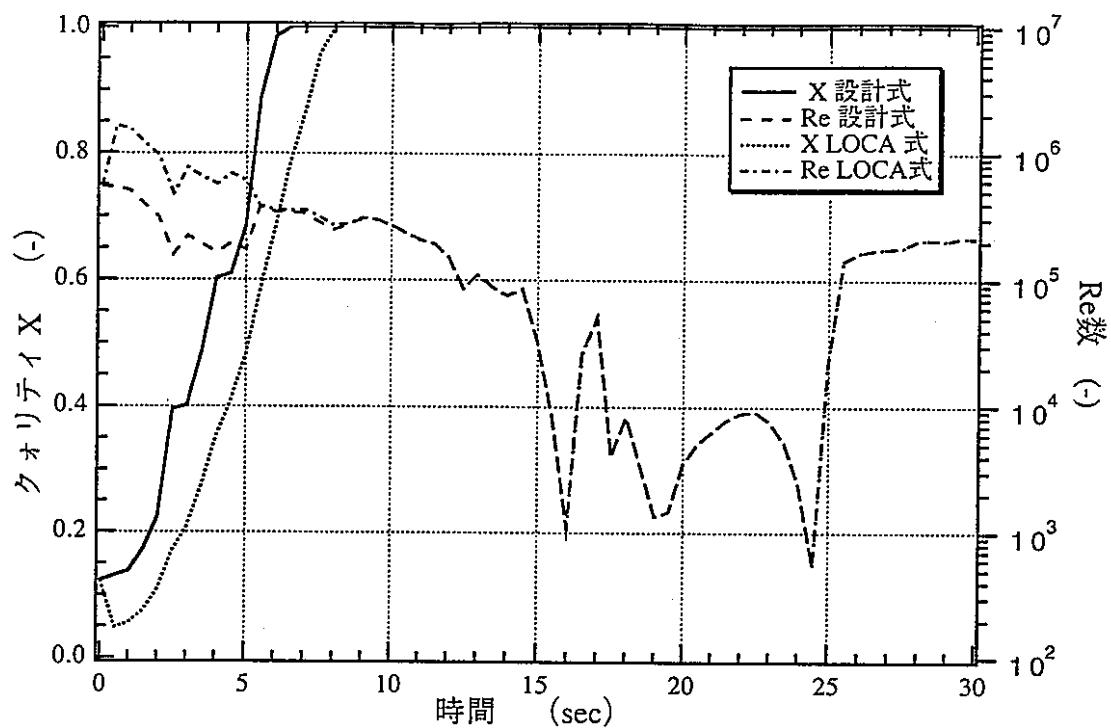


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

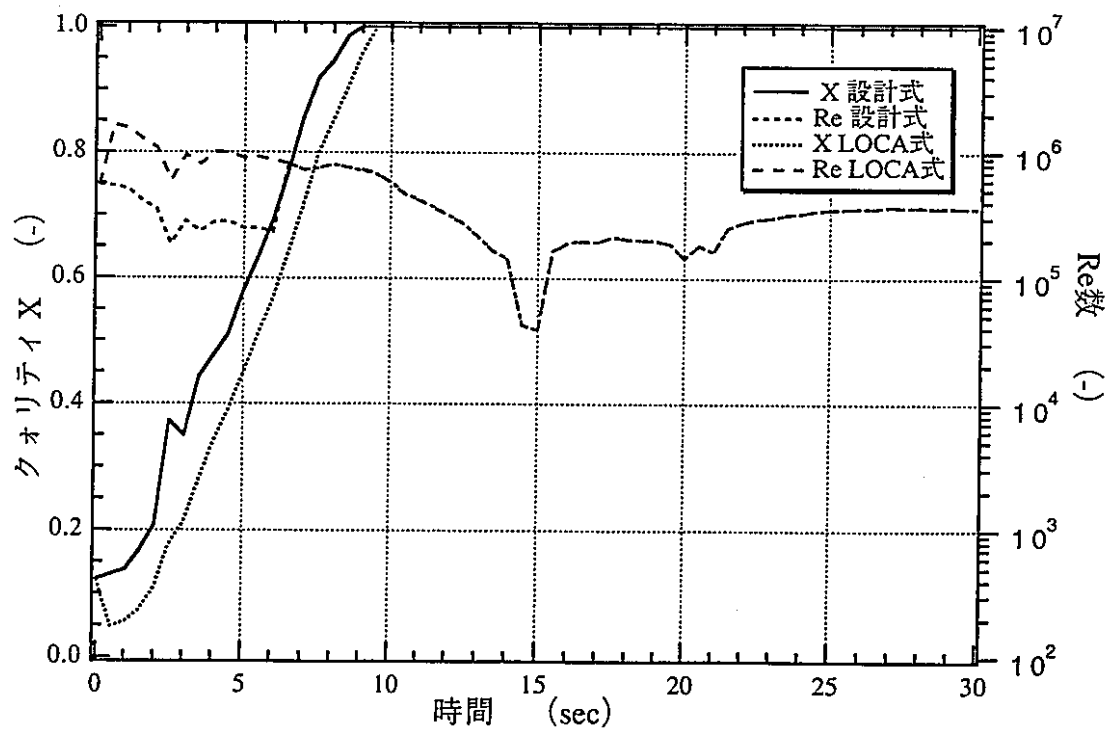


ケース2A (EV入口弁3B、EV出口弁 6B)

図3.4-23 クオリティと  $Re$  数 入口ノード (EVリンク 9)

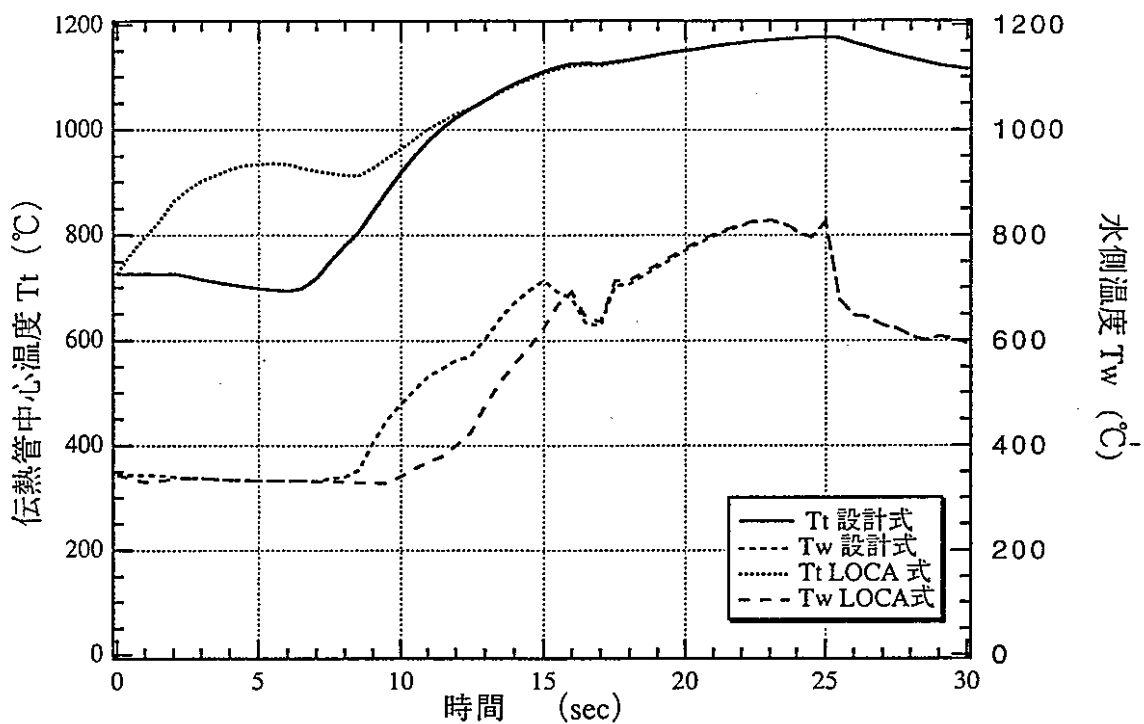


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

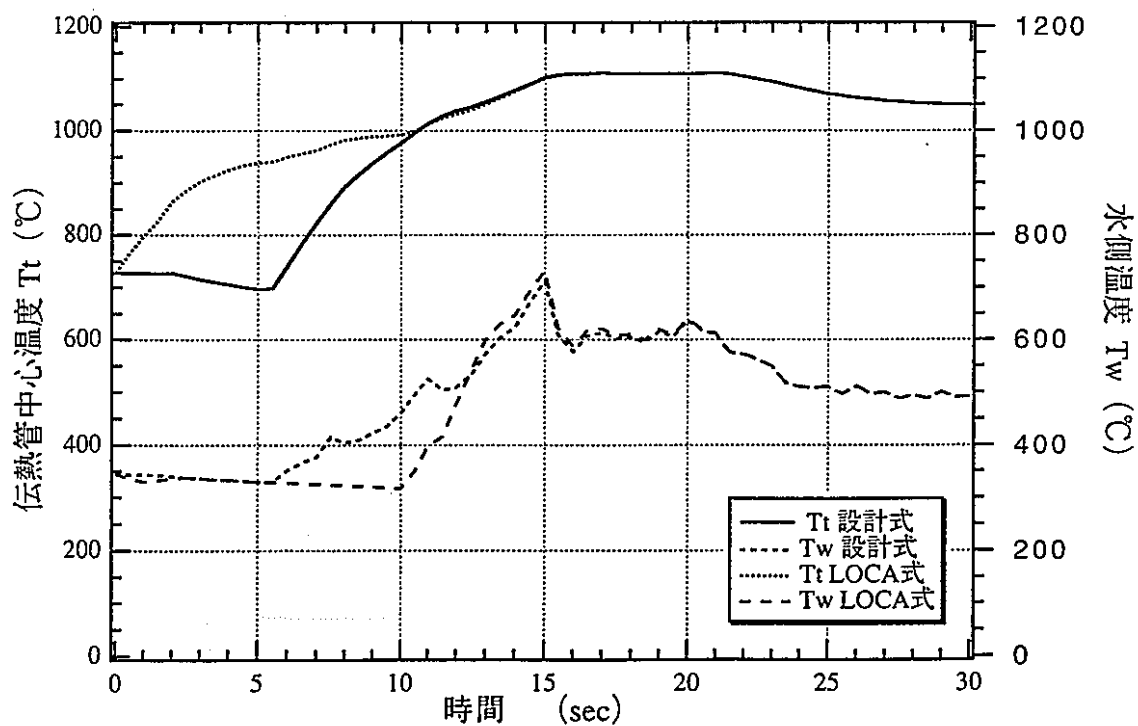


ケース2A (EV入口弁3B、EV出口弁 6B)

図3.4-24 クオリティと Re 数 出口ノード (EV リンク 9)

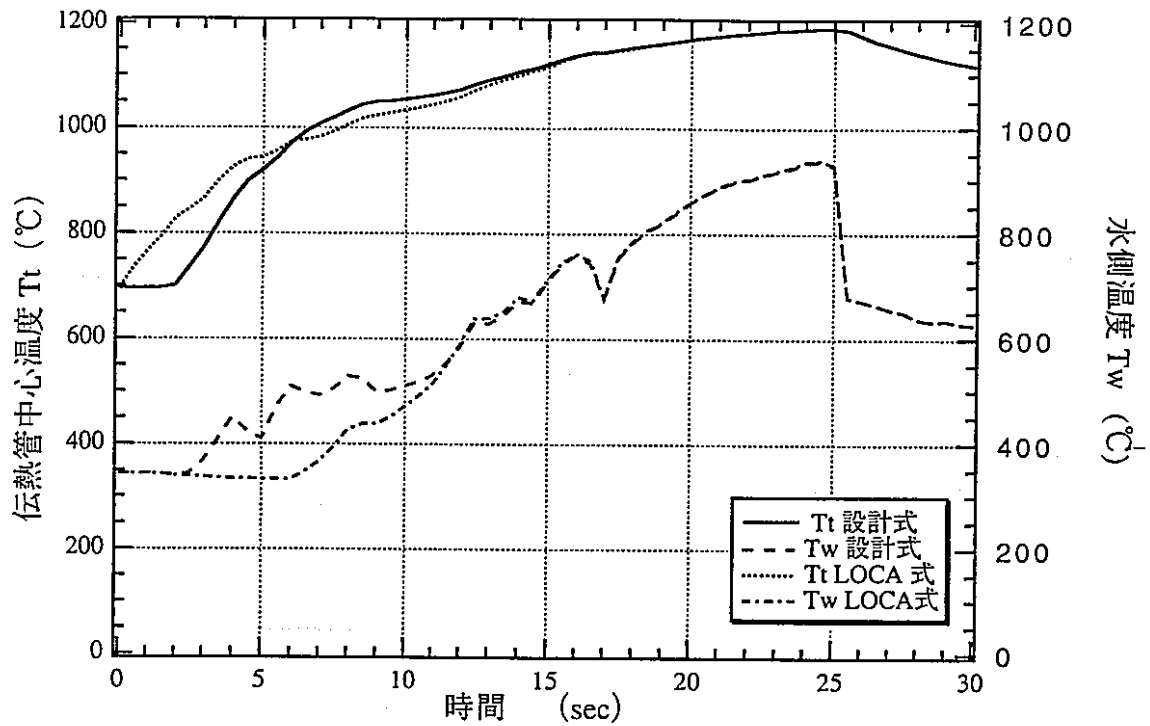


ケース1B (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

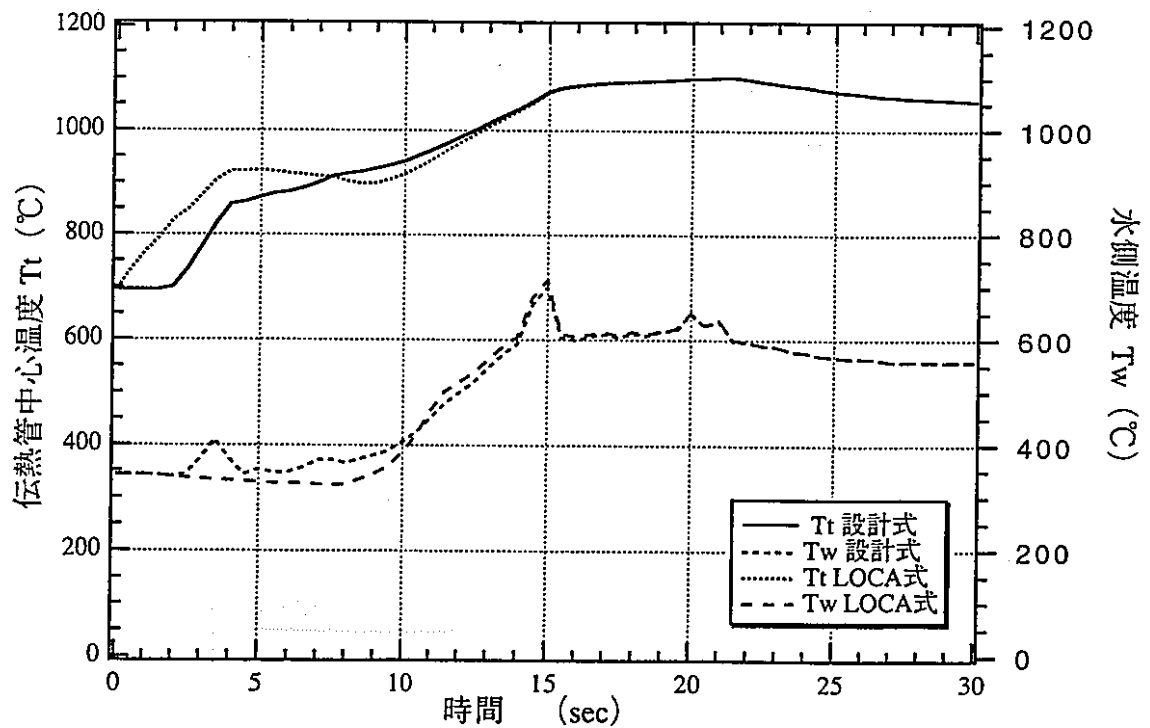


ケース2B (EV入口弁3B、EV出口弁 6B)

図3.4-25 伝熱管中心温度と水側温度 (EV リンク 6)

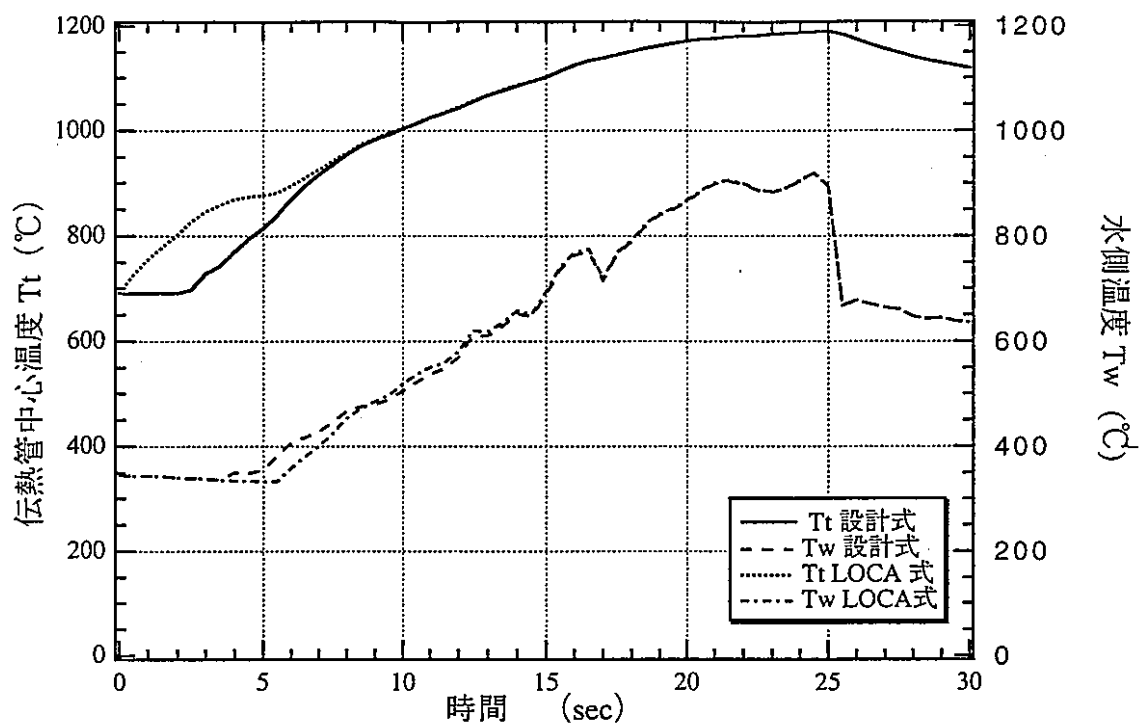


ケース1B (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

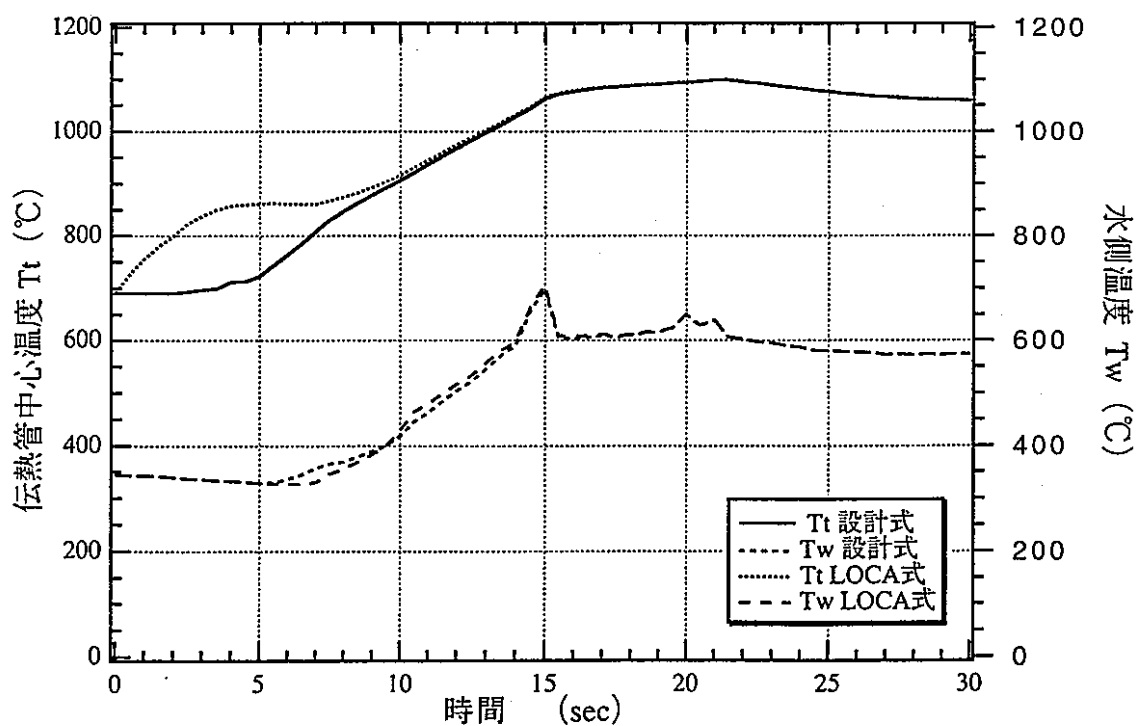


ケース2B (EV入口弁3B、EV出口弁6B)

図3.4-26 伝熱管中心温度と水側温度 (EV リンク 8)

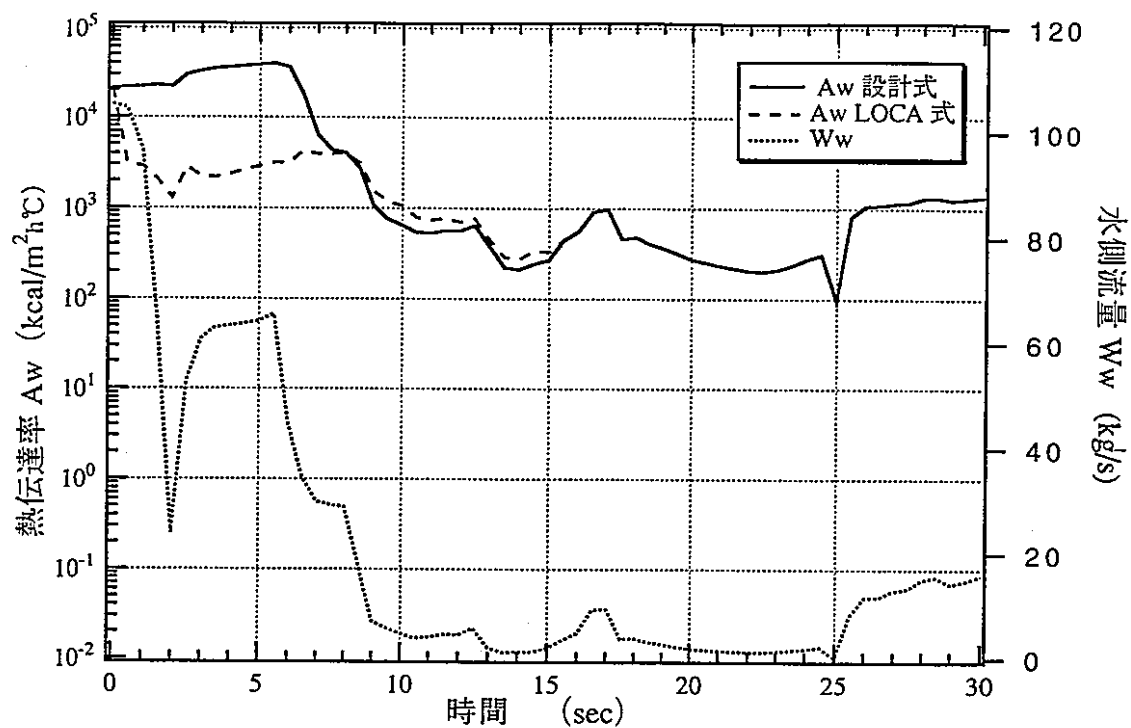


ケース1B (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

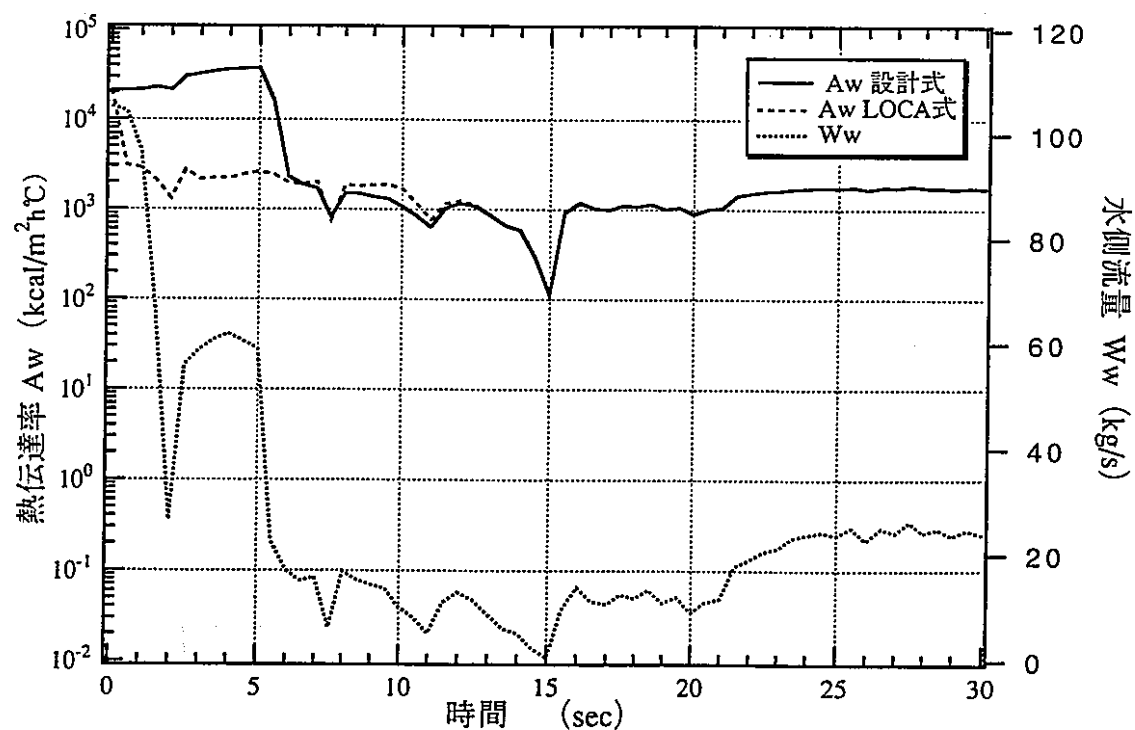


ケース2B (EV入口弁3B、EV出口弁 6B)

図3.4-27 伝熱管中心温度と水側温度 (EV リンク 9)



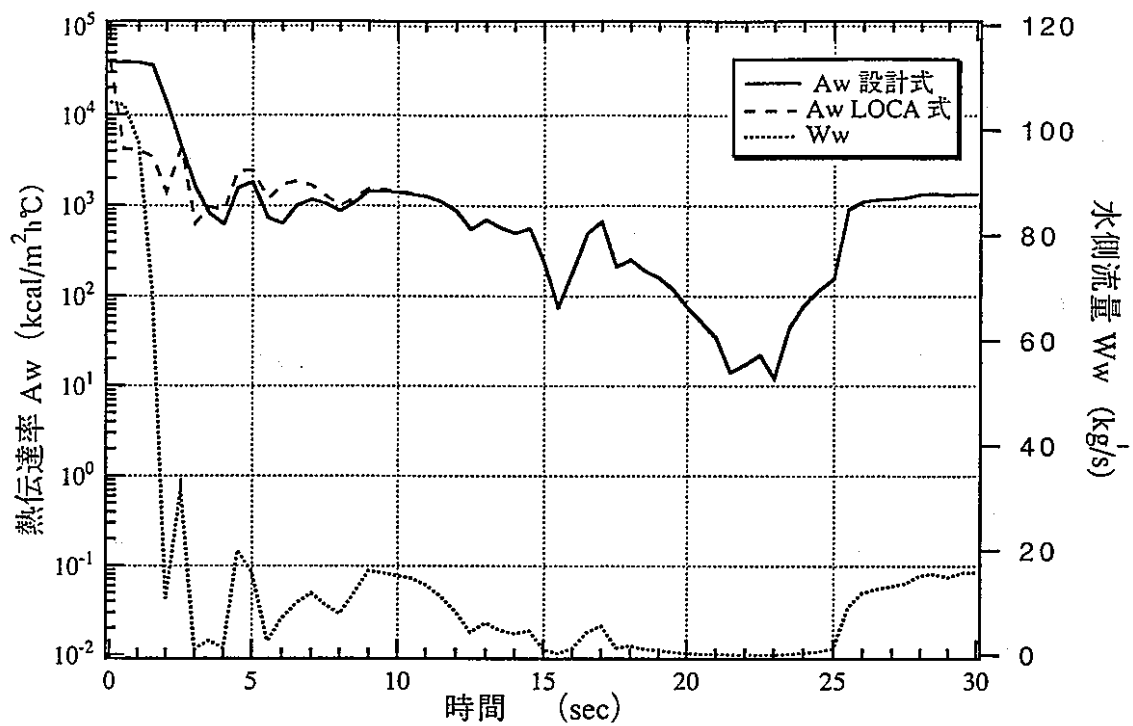
ケース1B (EV入口弁3B、EV出口弁4B)



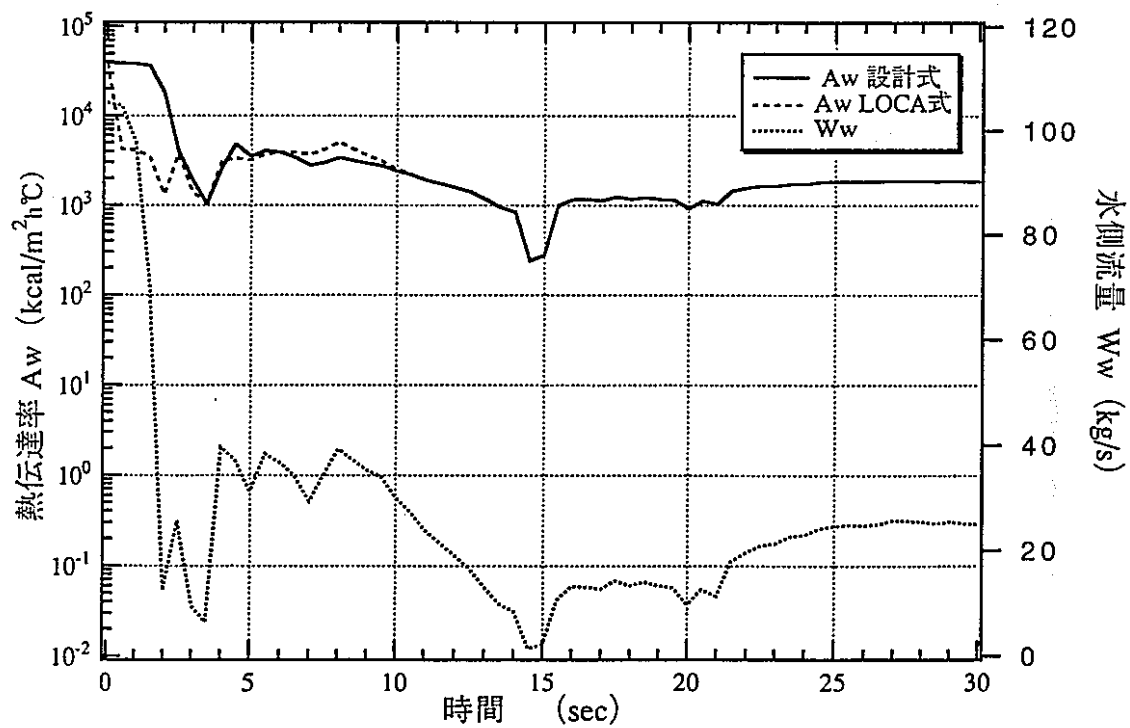
ケース2B (EV入口弁3B、EV出口弁 6B)

図3.4-28 水側熱伝達率と流量 (EV リンク 6)



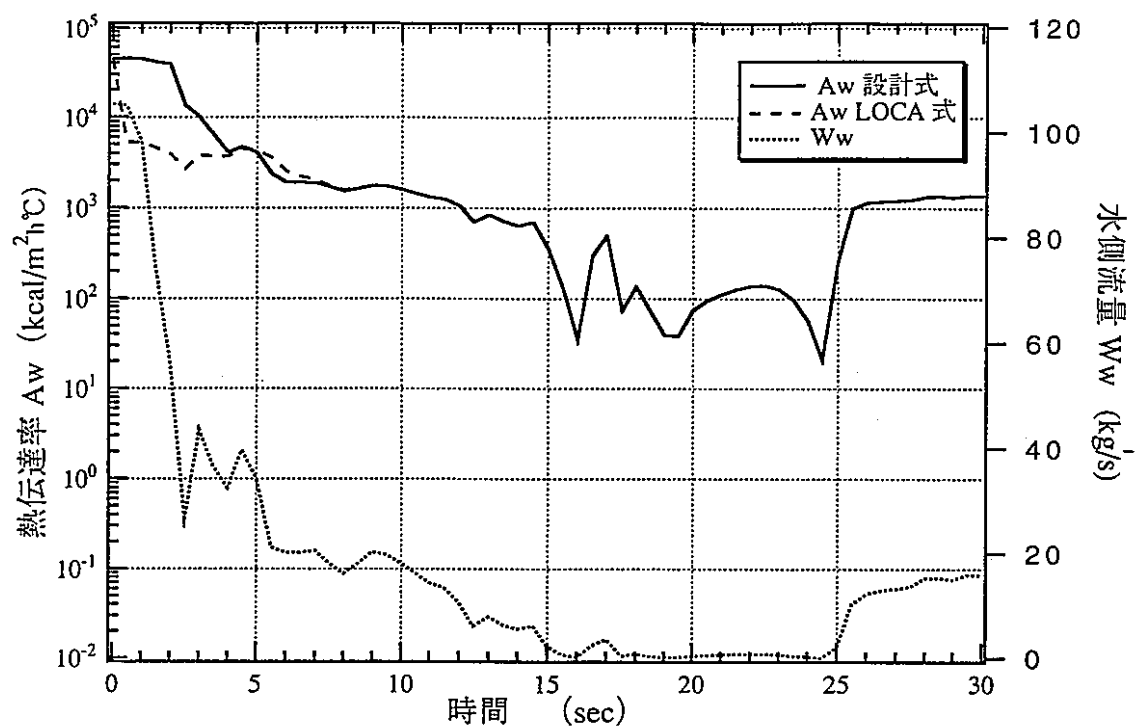


ケース1B (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

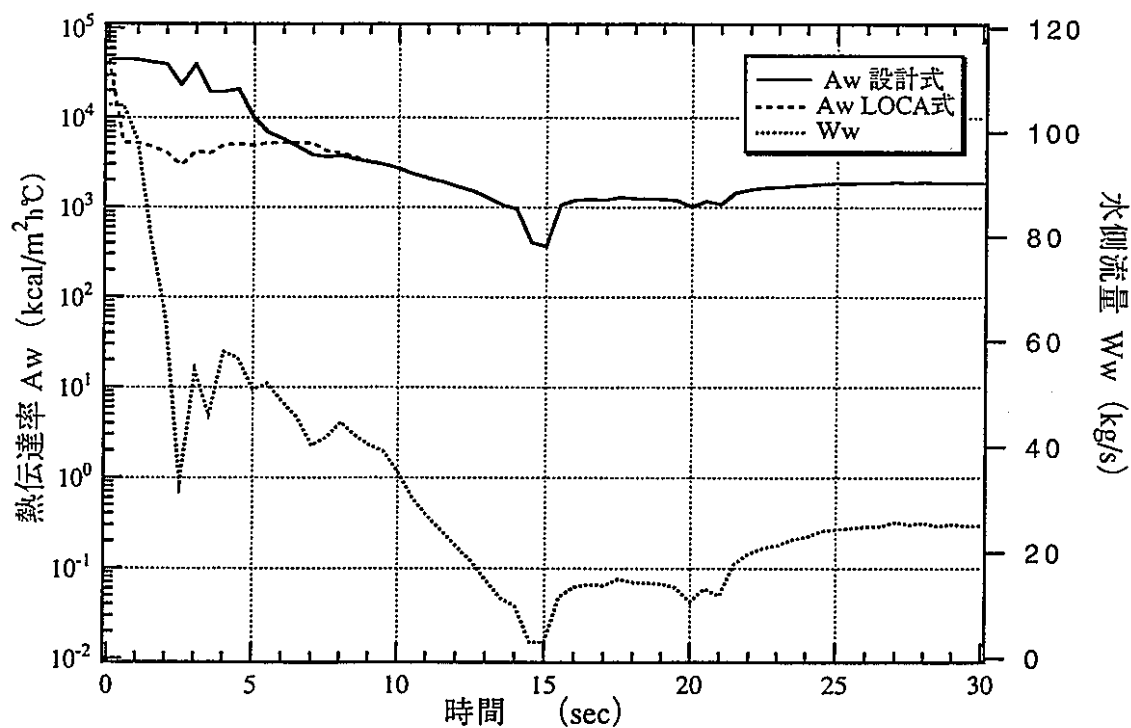


ケース2B (EV入口弁3B、EV出口弁 6B)

図3.4-29 水側熱伝達率と流量 (EV リンク 8)

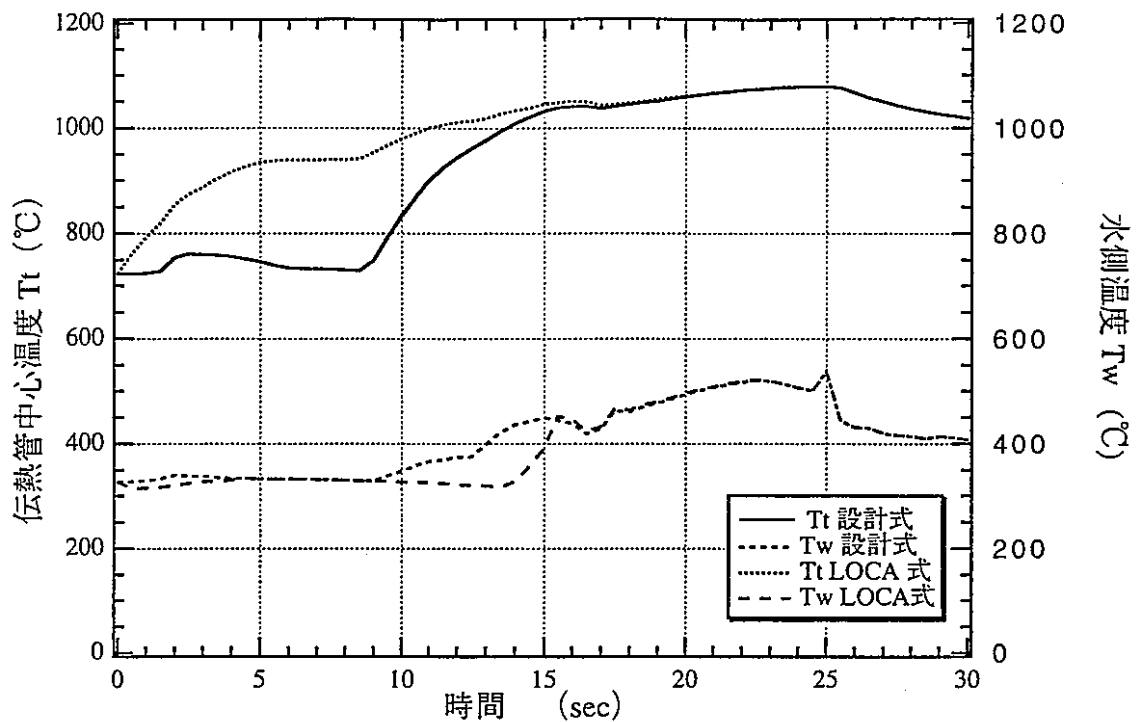


ケース1B (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

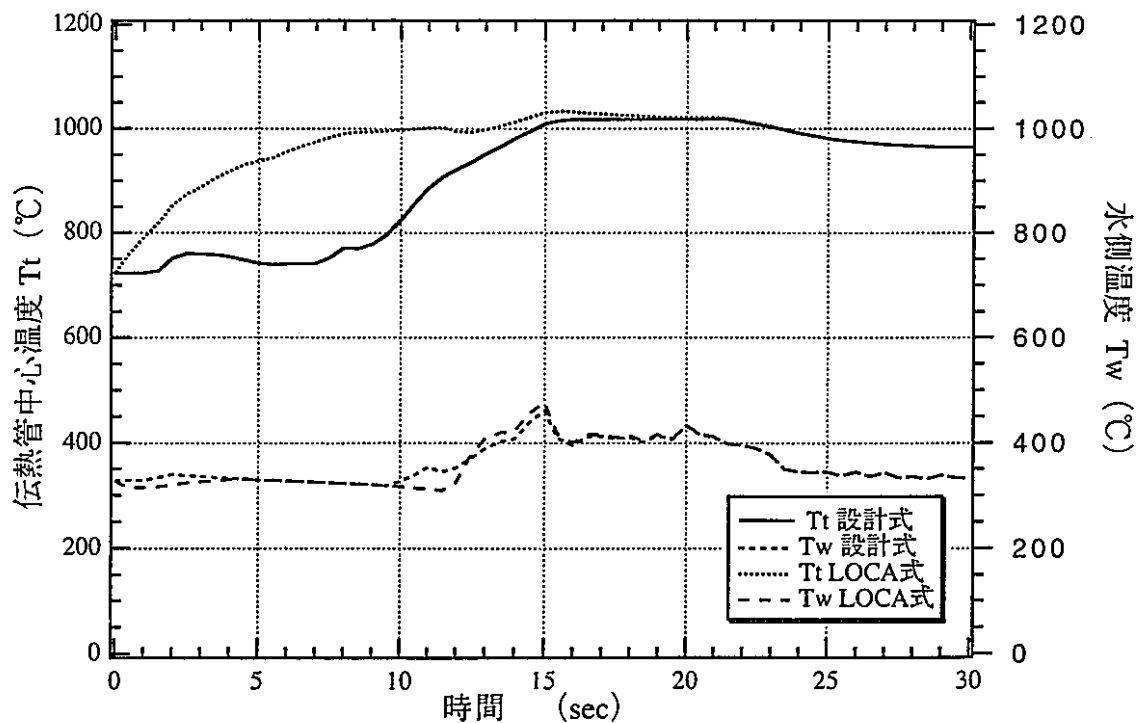


ケース2B (EV入口弁3B、EV出口弁 6B)

図3.4-30 水側熱伝達率と流量 (EVリンク 9)

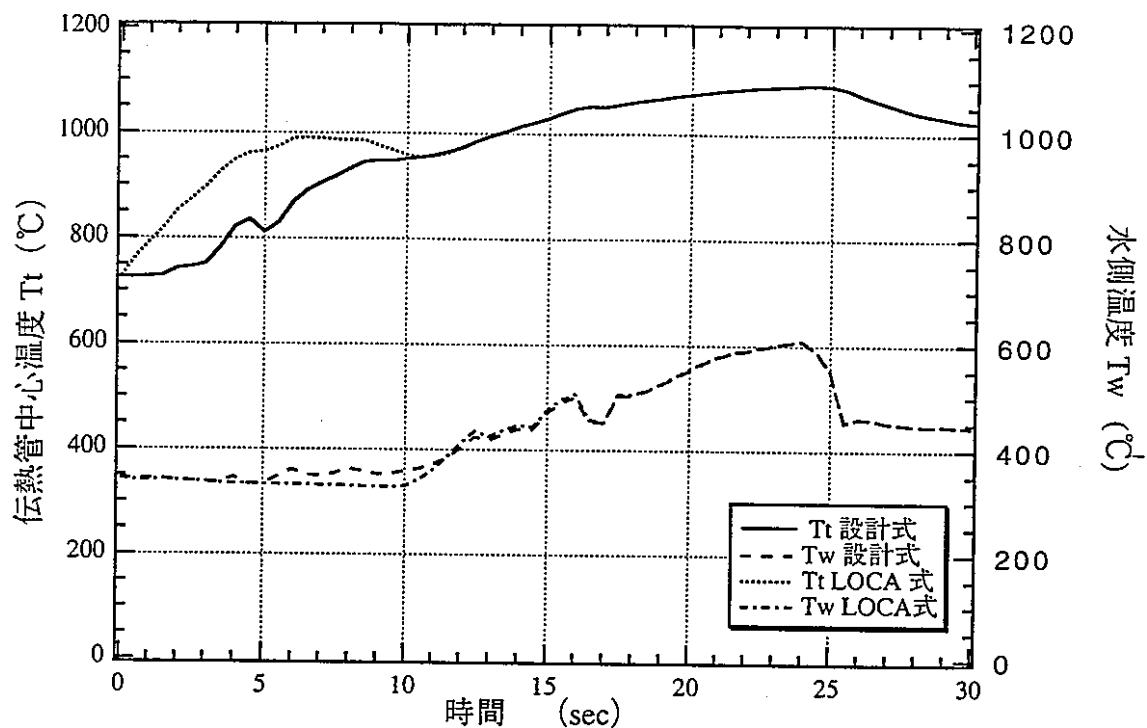


ケース1C (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

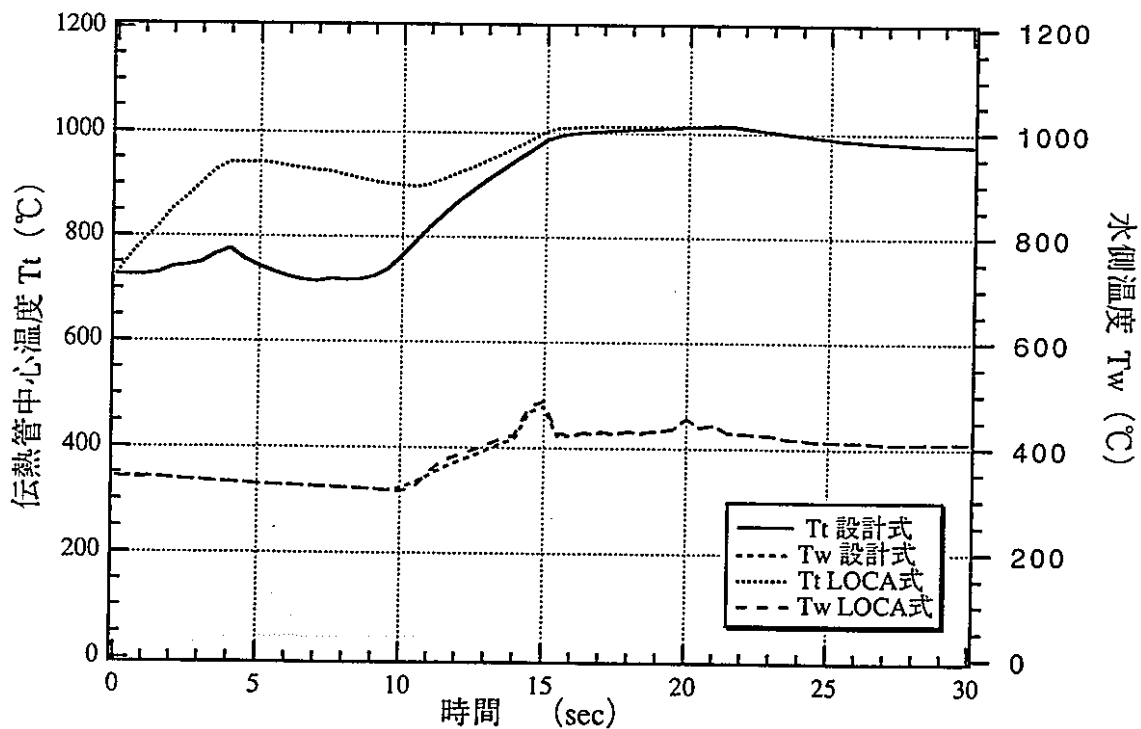


ケース2C (EV入口弁3B、EV出口弁 6B)

図3.4-31 伝熱管中心温度と水側温度 (EV リンク 6)

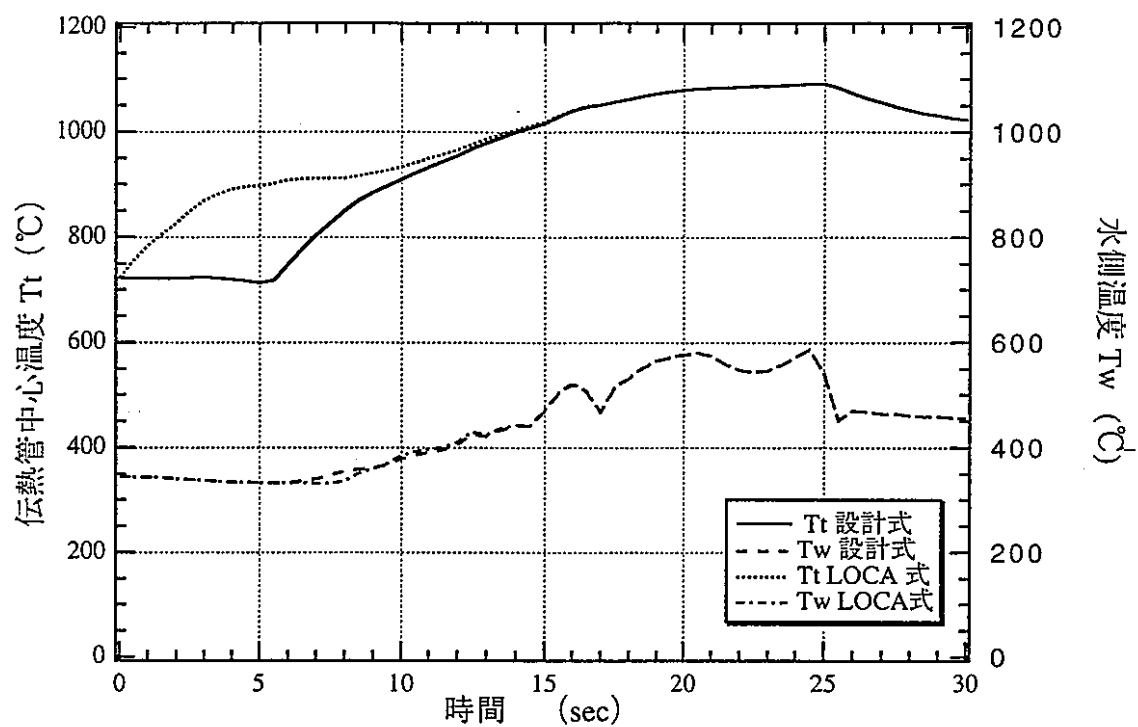


ケース1C (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

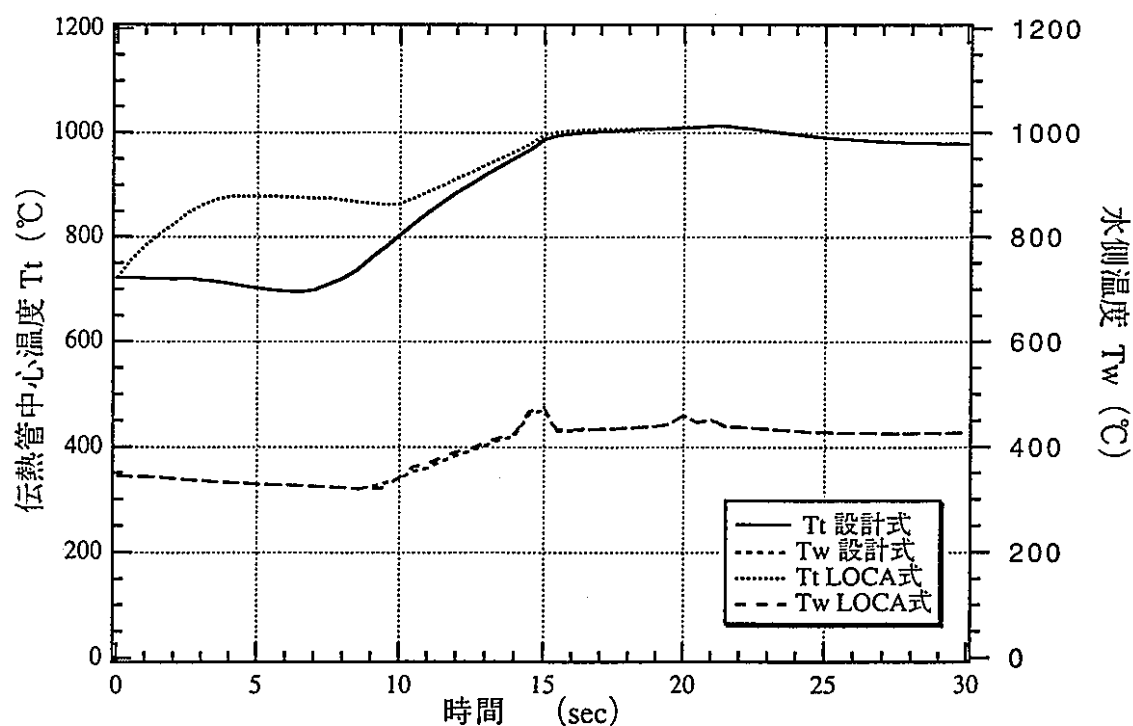


ケース2C (EV入口弁3B、EV出口弁 6B)

図3.4-32 伝熱管中心温度と水側温度 (EVリンク 8)

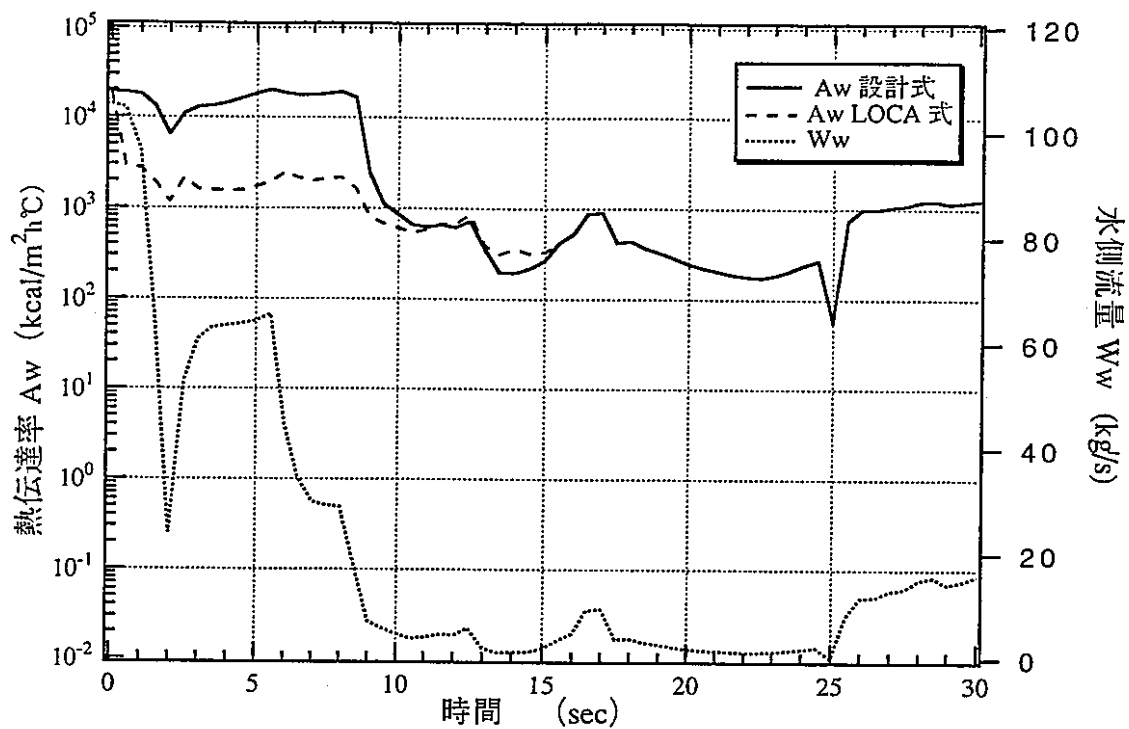


ケース1C (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

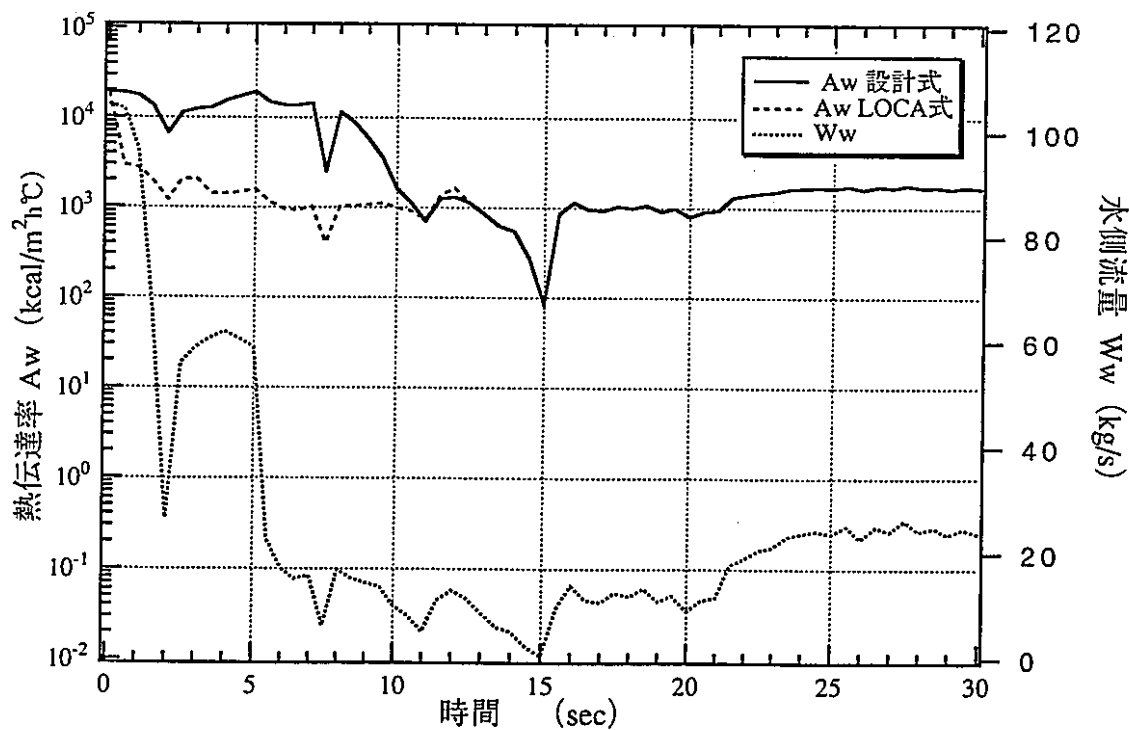


ケース2C (EV入口弁3B、EV出口弁 6B)

図3.4-33 伝熱管中心温度と水側温度 (EV リンク 9)

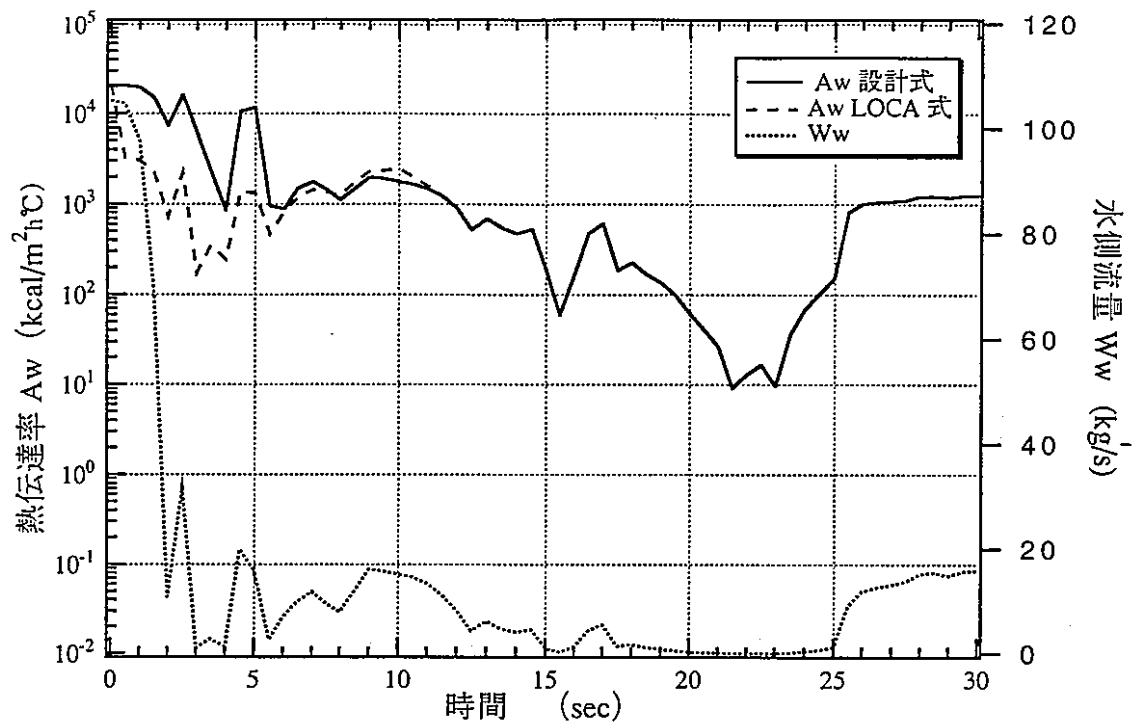


ケース1C (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

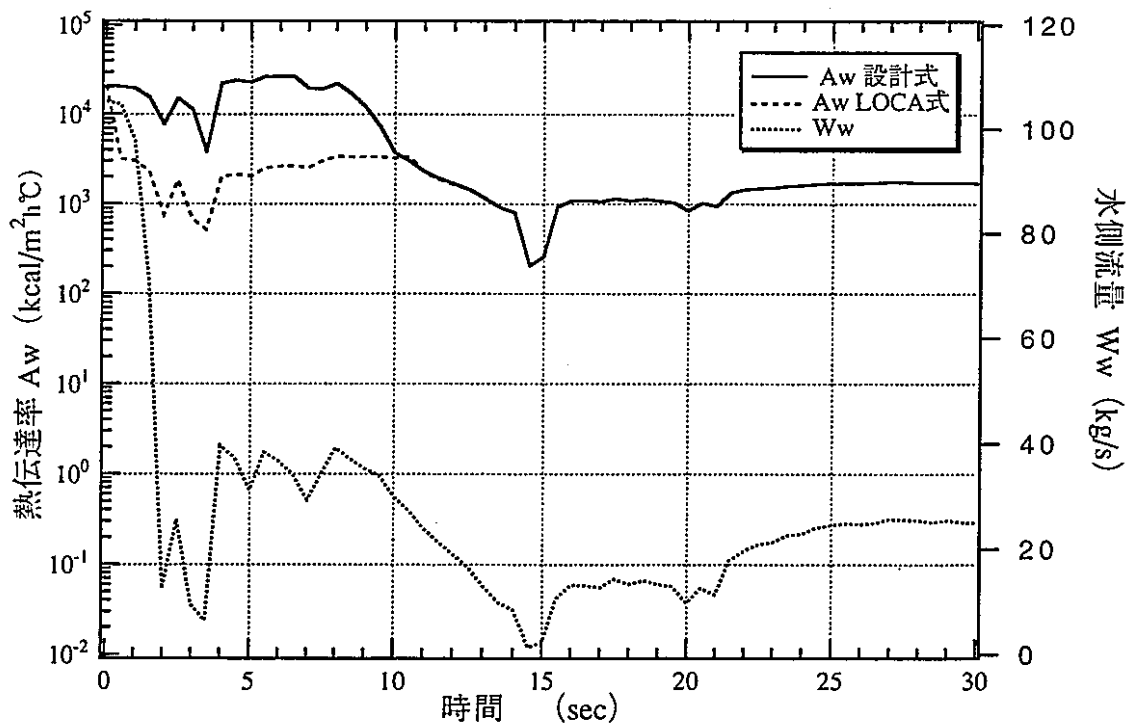


ケース2C (EV入口弁3B、EV出口弁 6B)

図3.4-34 水側熱伝達率と流量 (EV リンク 6)

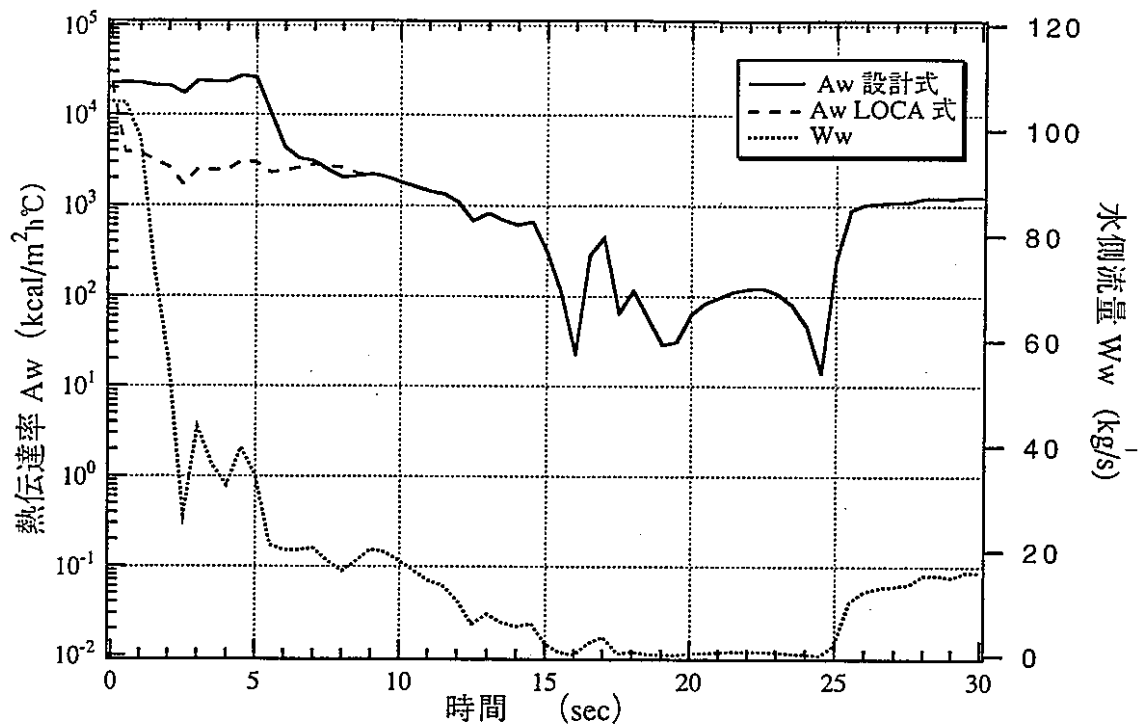


ケース1C (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

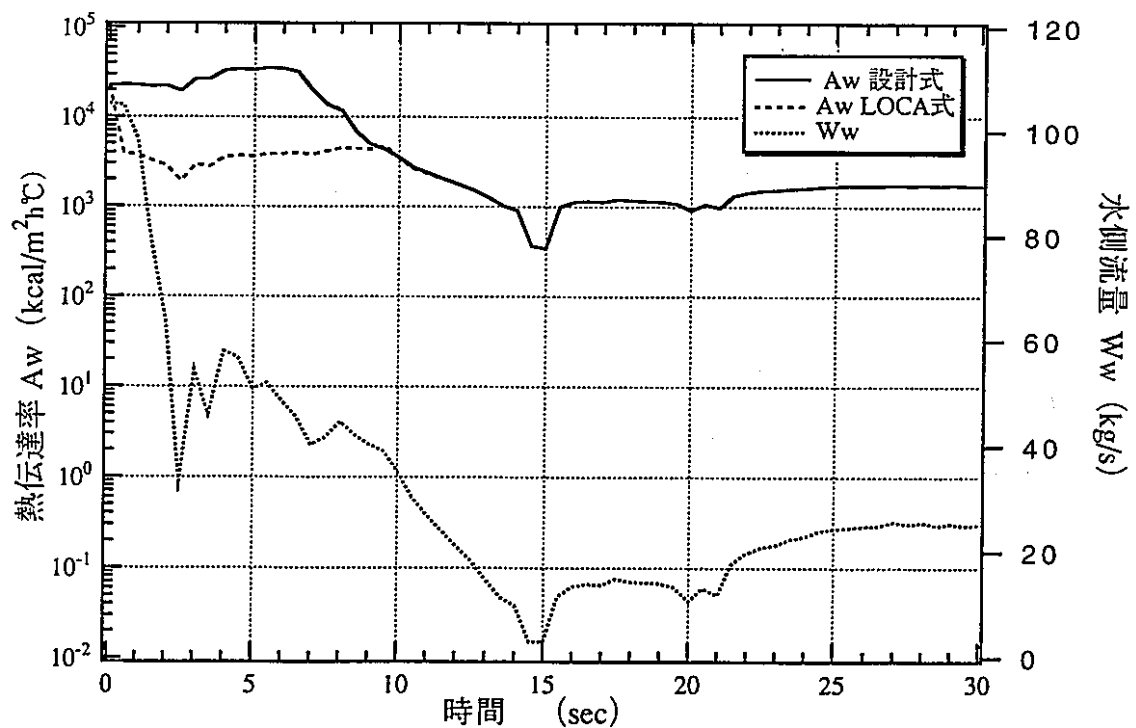


ケース2C (EV入口弁3B、EV出口弁6B)

図3.4-35 水側熱伝達率と流量 (EVリンク8)



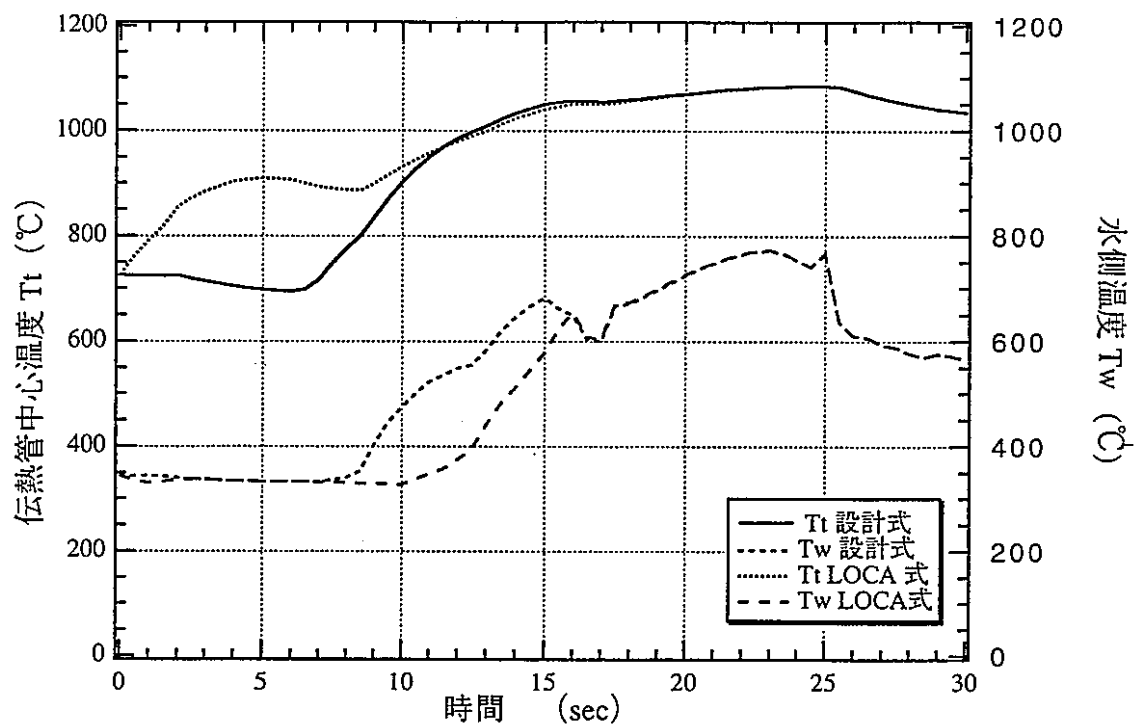
ケース1C (EV入口弁3B、EV出口弁4B)



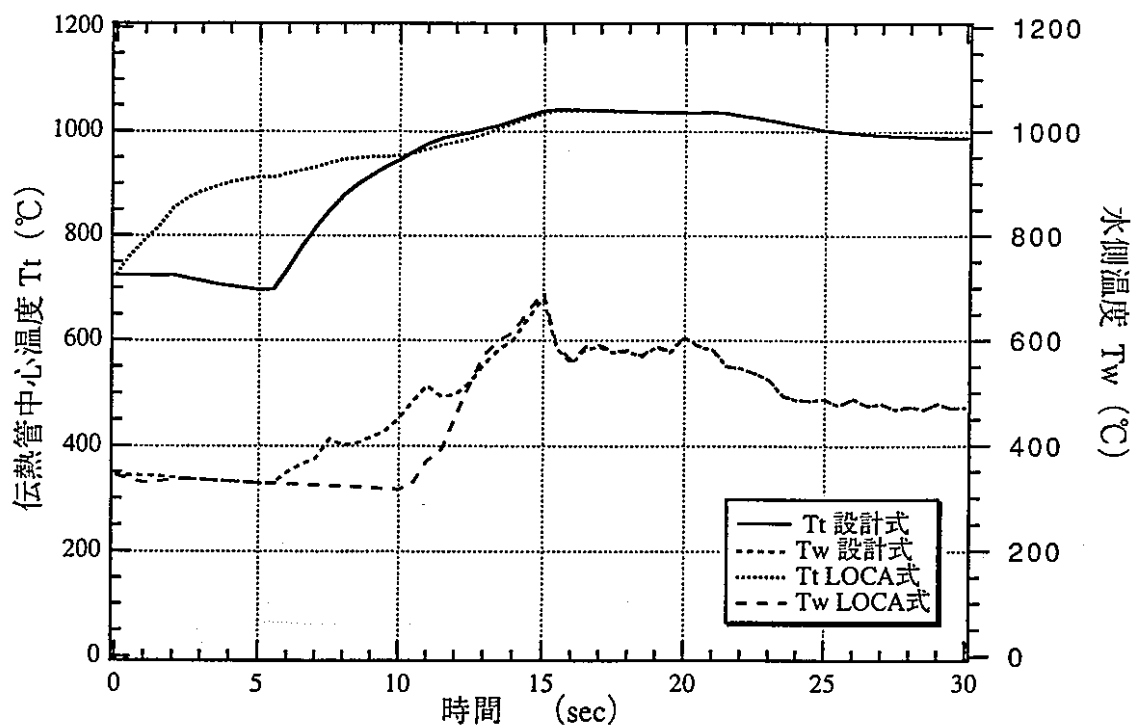
ケース2C (EV入口弁3B、EV出口弁6B)

図3.4-36 水側熱伝達率と流量 (EVリンク 9)



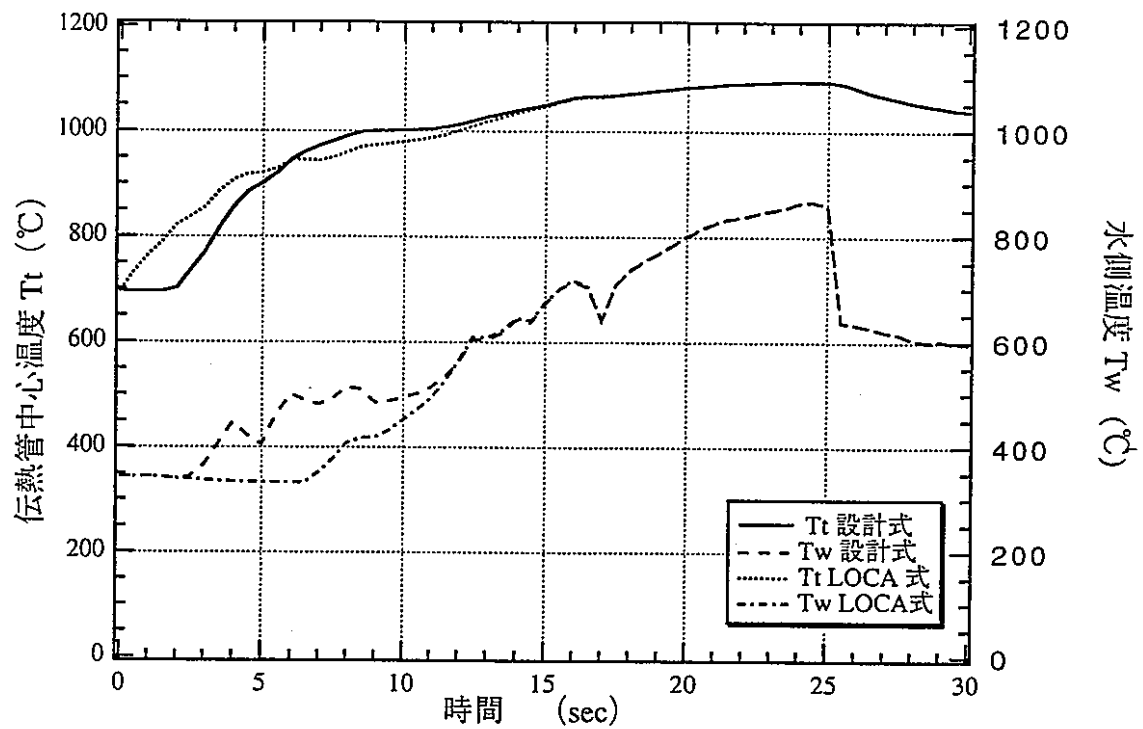


ケース1D (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

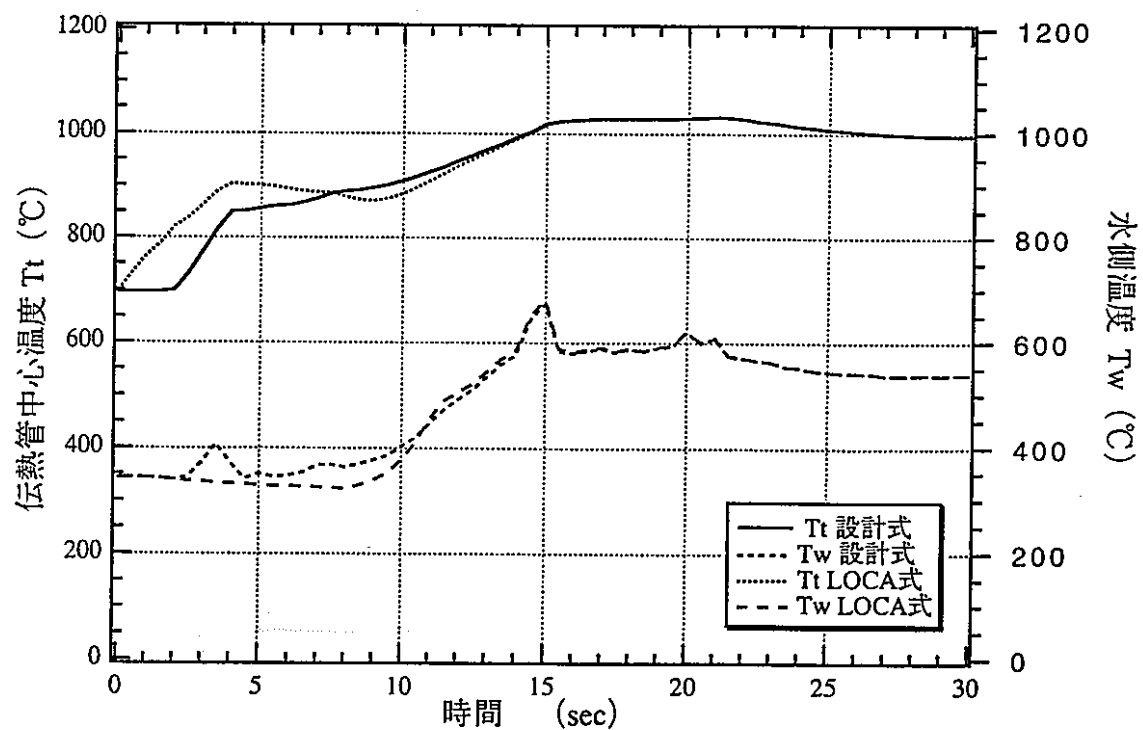


ケース2D (EV入口弁3B、EV出口弁 6B)

図3.4-37 伝熱管中心温度と水側温度 (EV リンク 6)

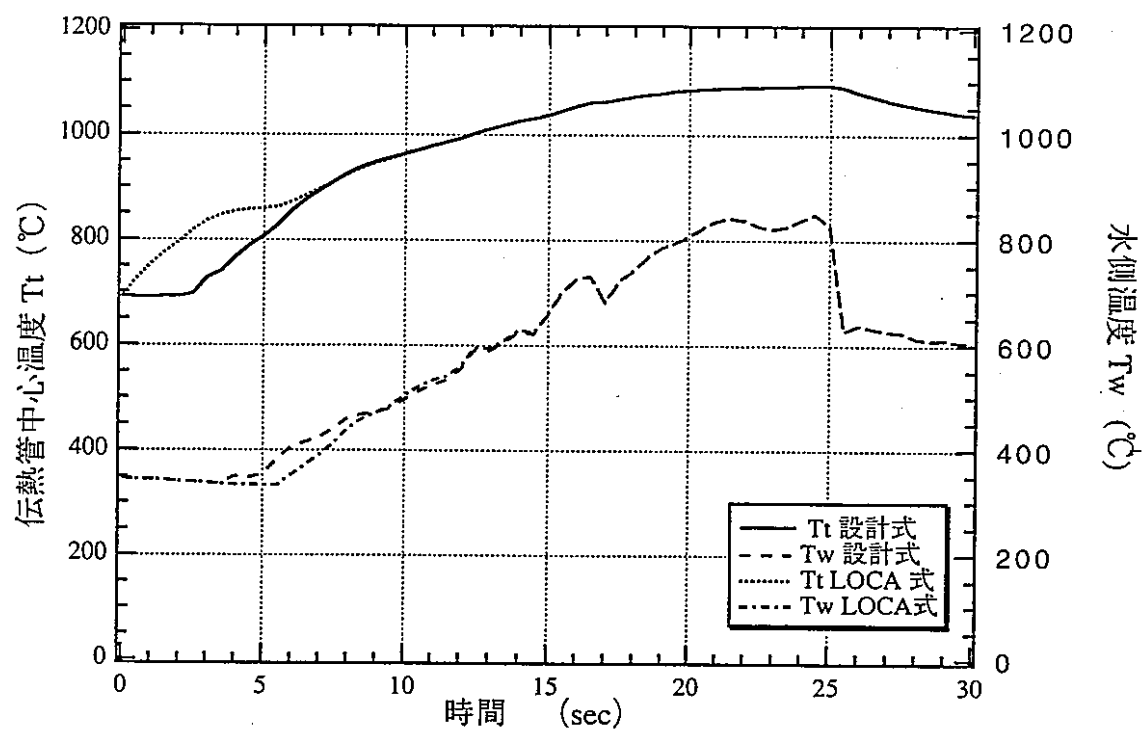


ケース1D (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

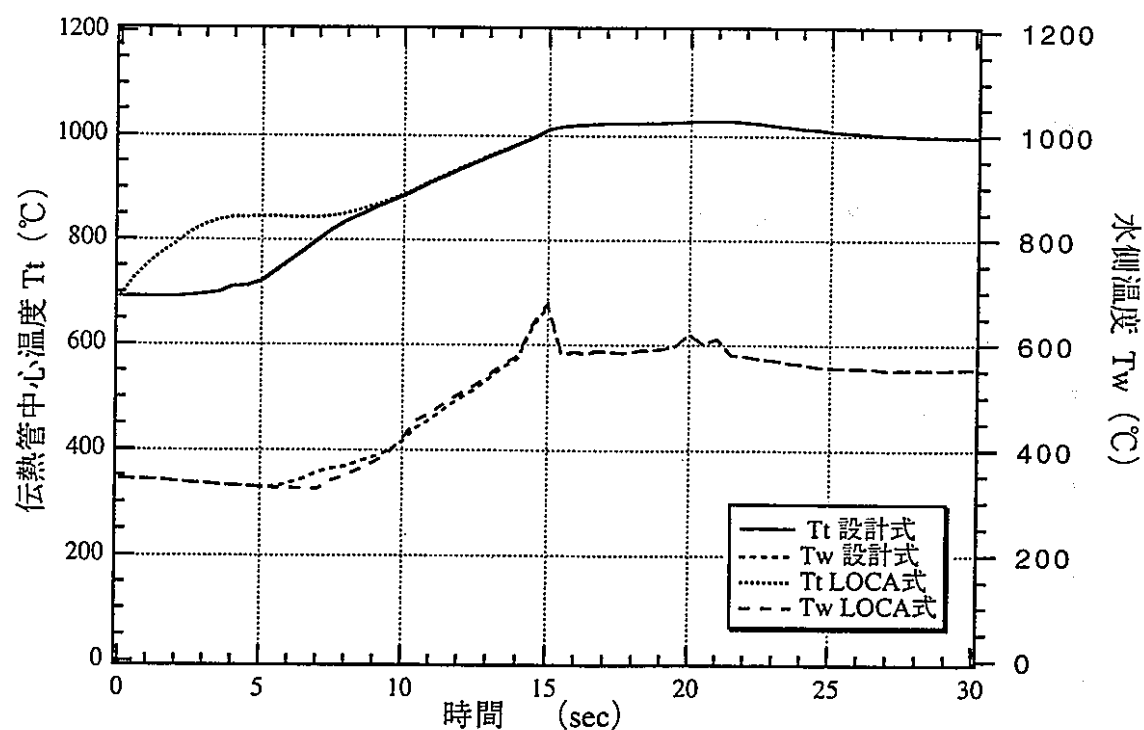


ケース2D (EV入口弁3B、EV出口弁 6B)

図3.4-38 伝熱管中心温度と水側温度 (EV リンク 8)

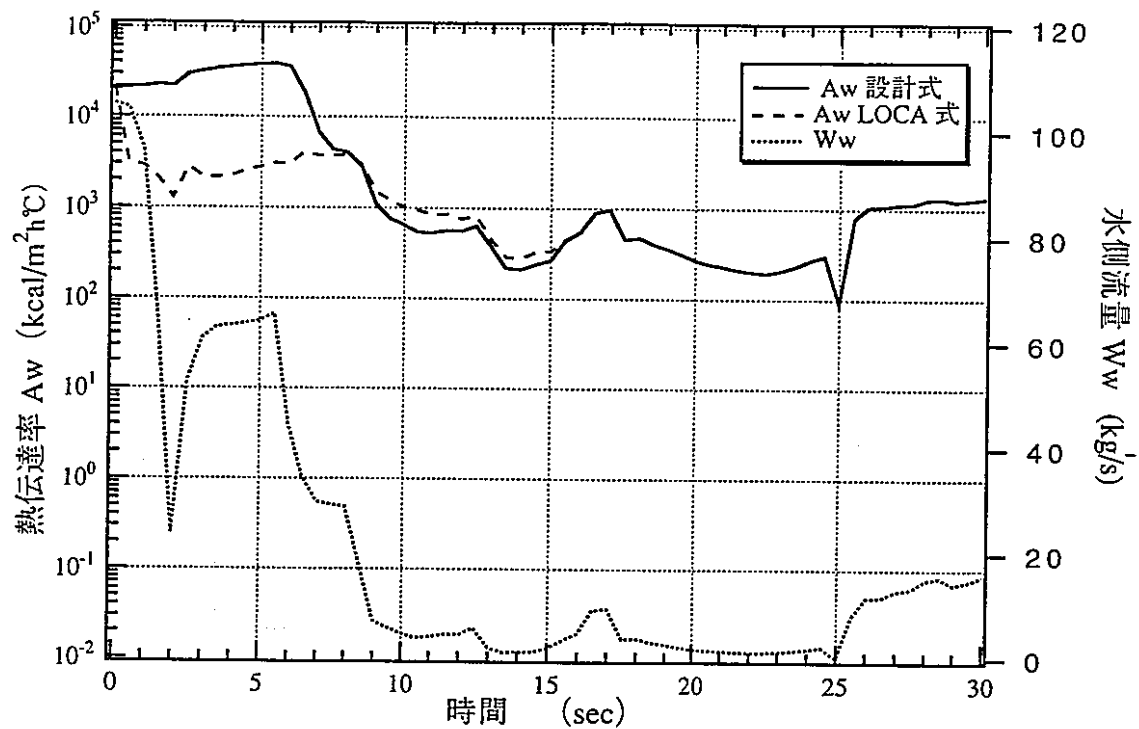


ケース1D (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

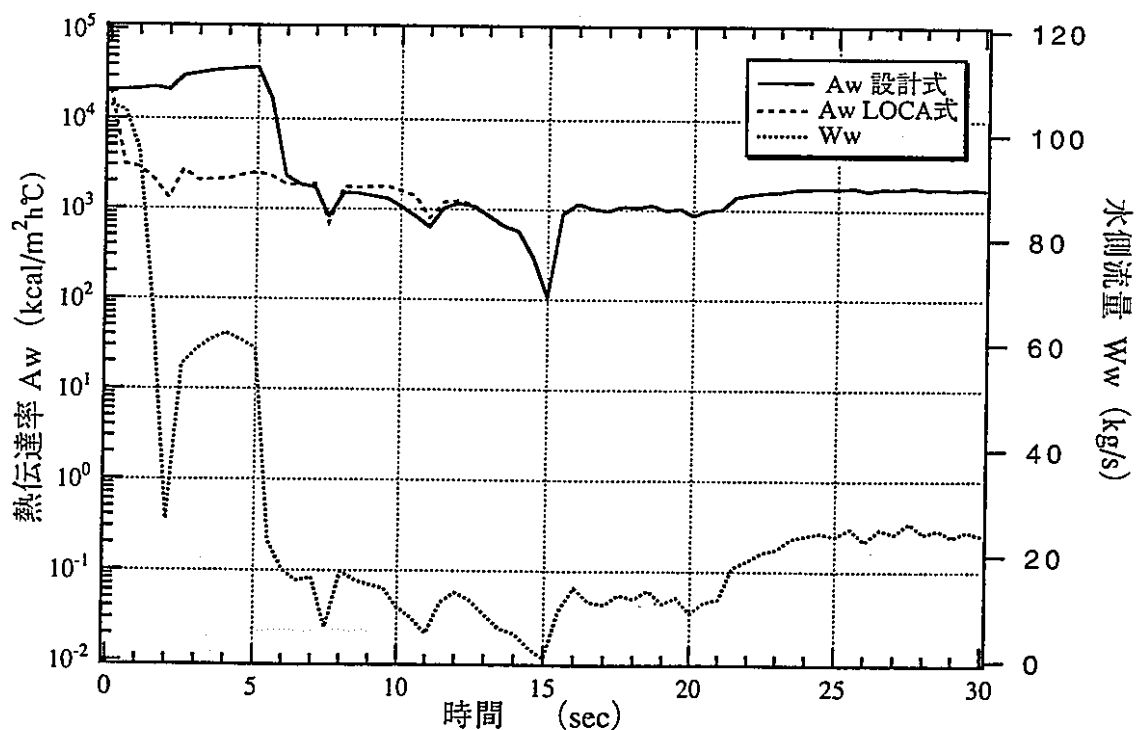


ケース2D (EV入口弁3B、EV出口弁 6B)

図3.4-39 伝熱管中心温度と水側温度 (EV リンク 9)

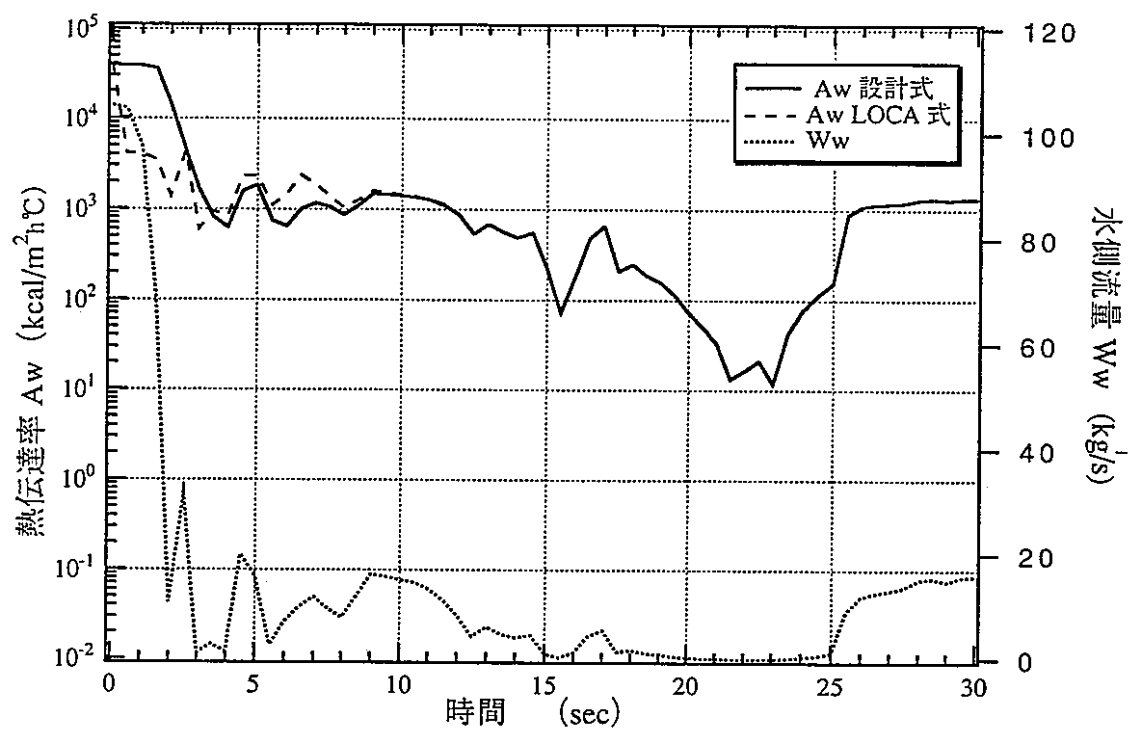


ケース1D (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

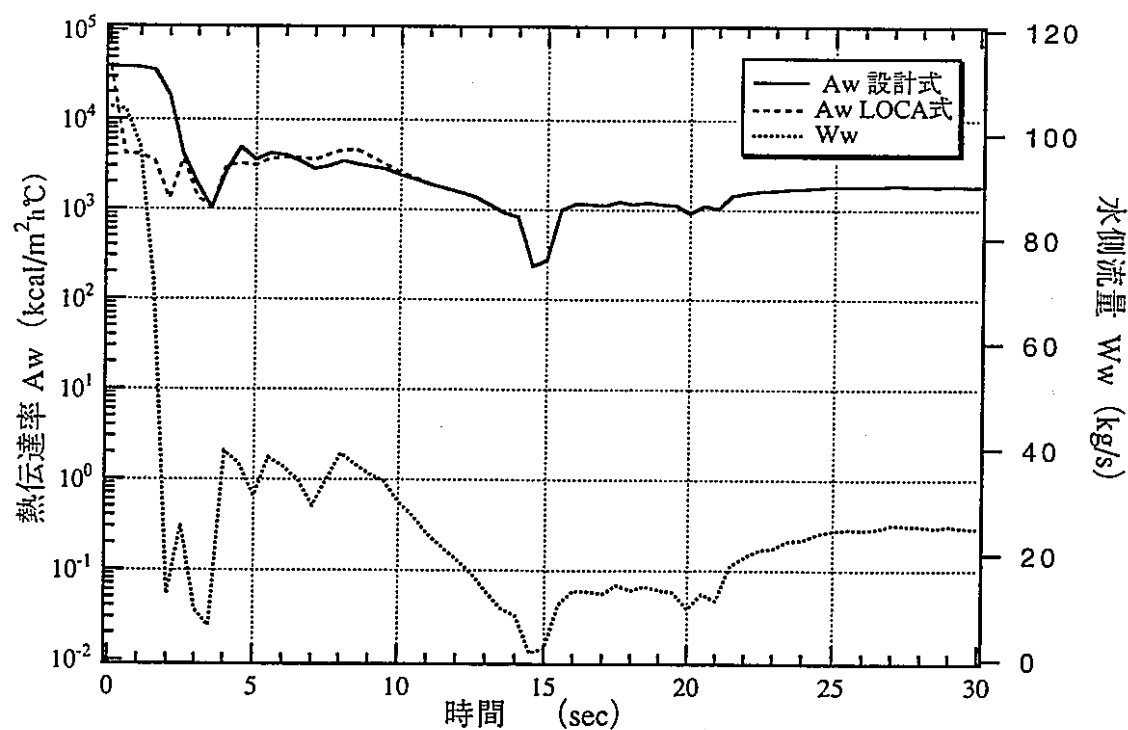


ケース2D (EV入口弁3B、EV出口弁6B)

図3.4-40 水側熱伝達率と流量 (EVリンク 6)

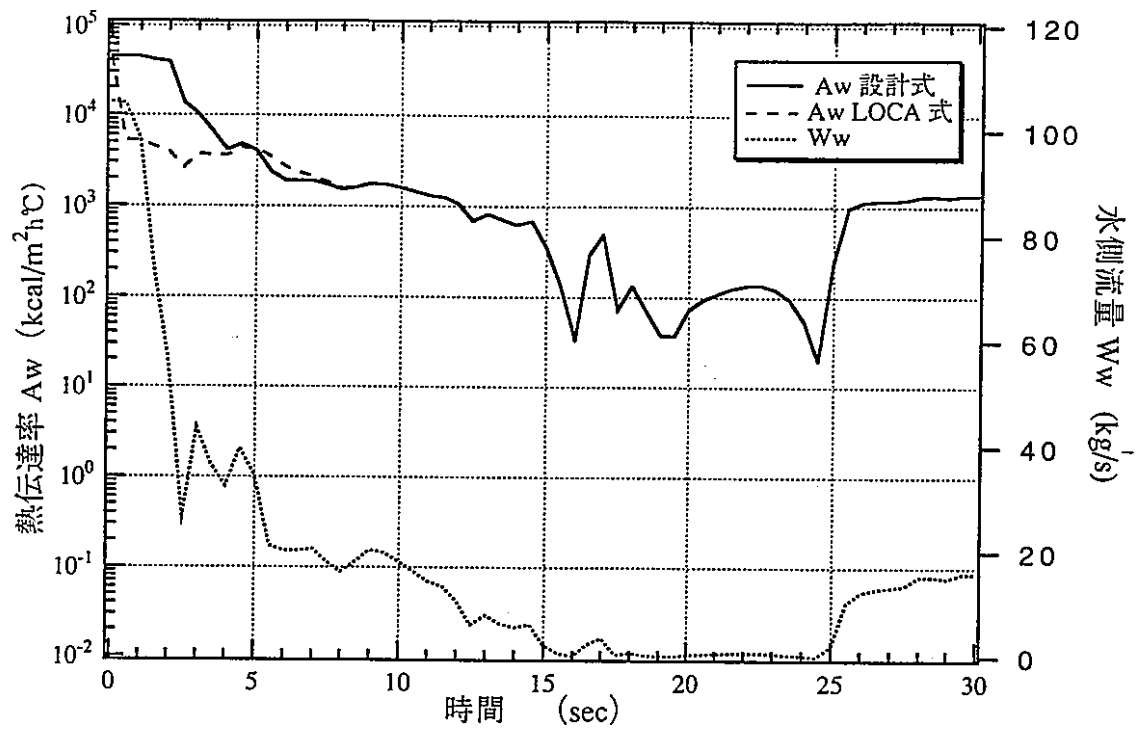


ケース1D (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

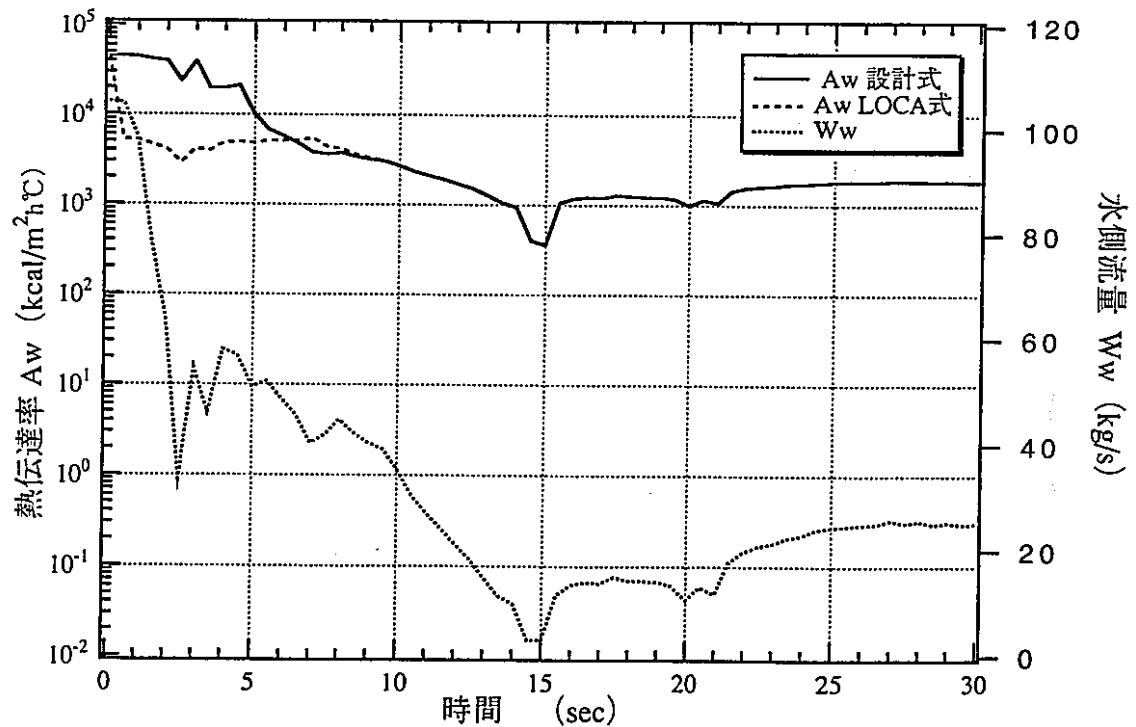


ケース2D (EV入口弁3B、EV出口弁 6B)

図3.4-41 水側熱伝達率と流量 (EV リンク 8)

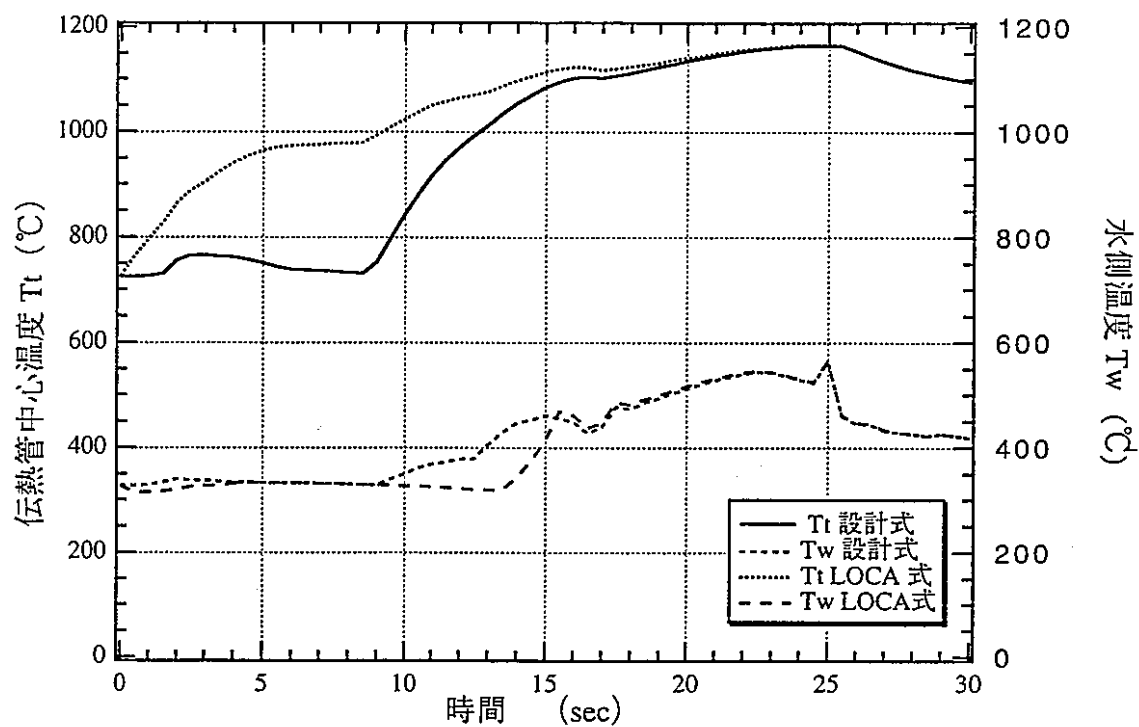


ケース1D (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

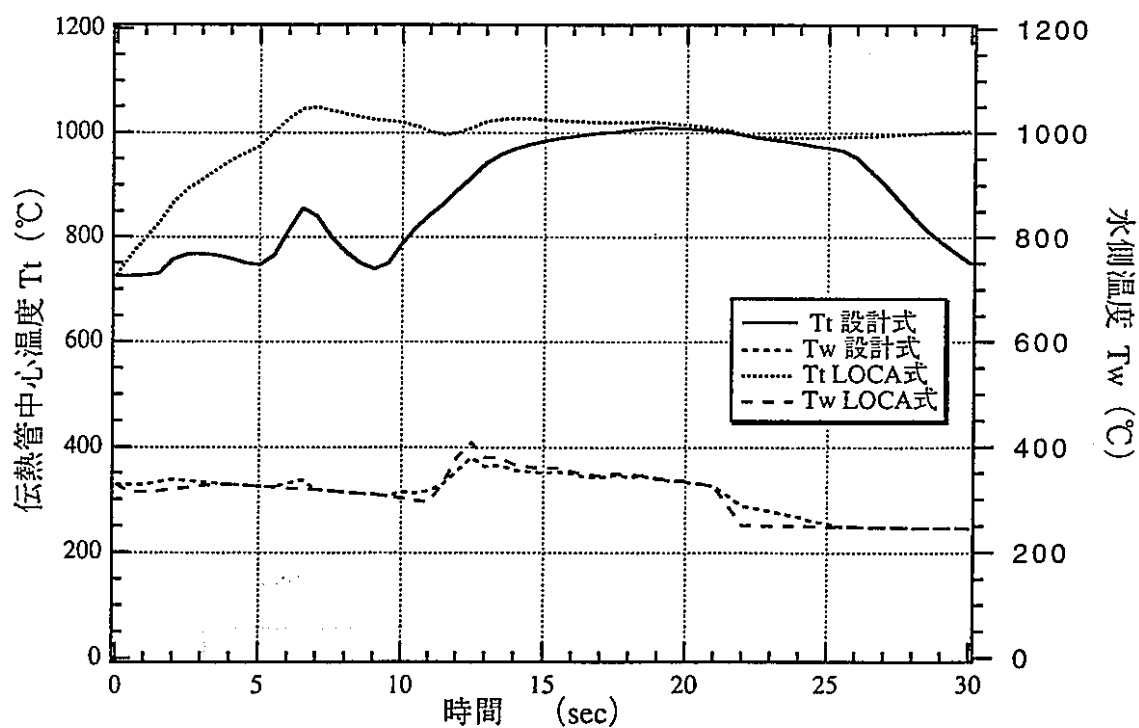


ケース2D (EV入口弁3B、EV出口弁 6B)

図3.4-42 水側熱伝達率と流量 (EV リンク 9)

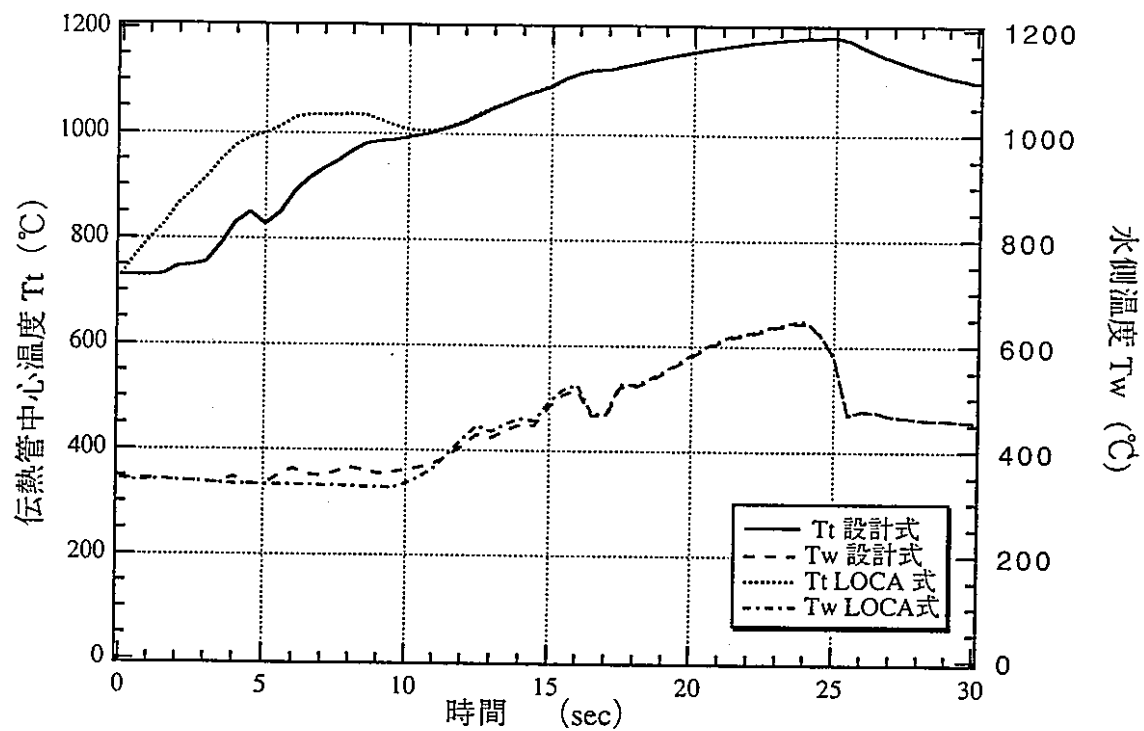


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

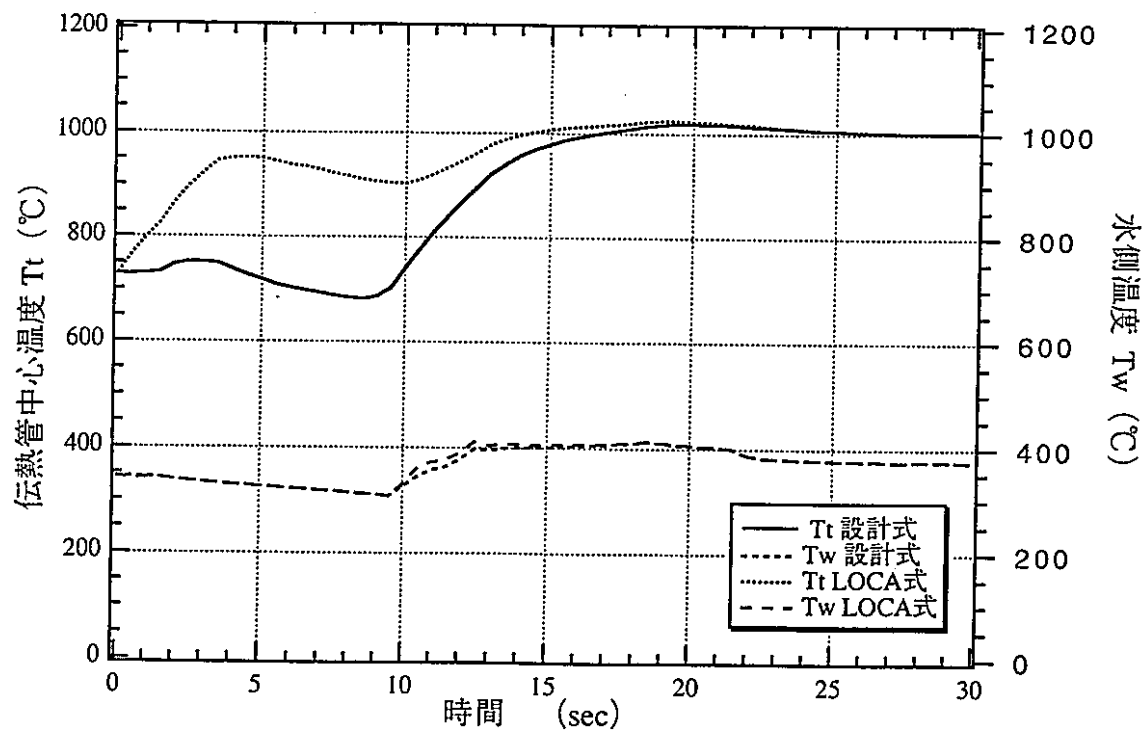


ケース3A (EV入口弁3B、EV出口弁 8B)

図3.4-43 伝熱管中心温度と水側温度 (EV リンク 6)



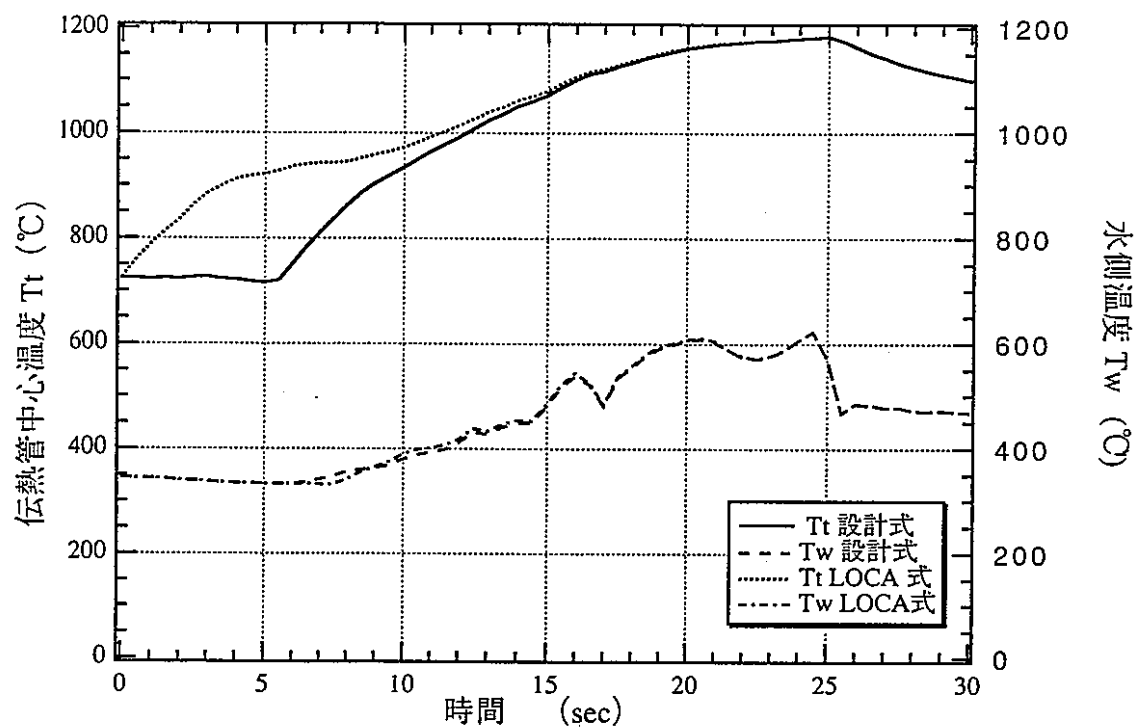
ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)



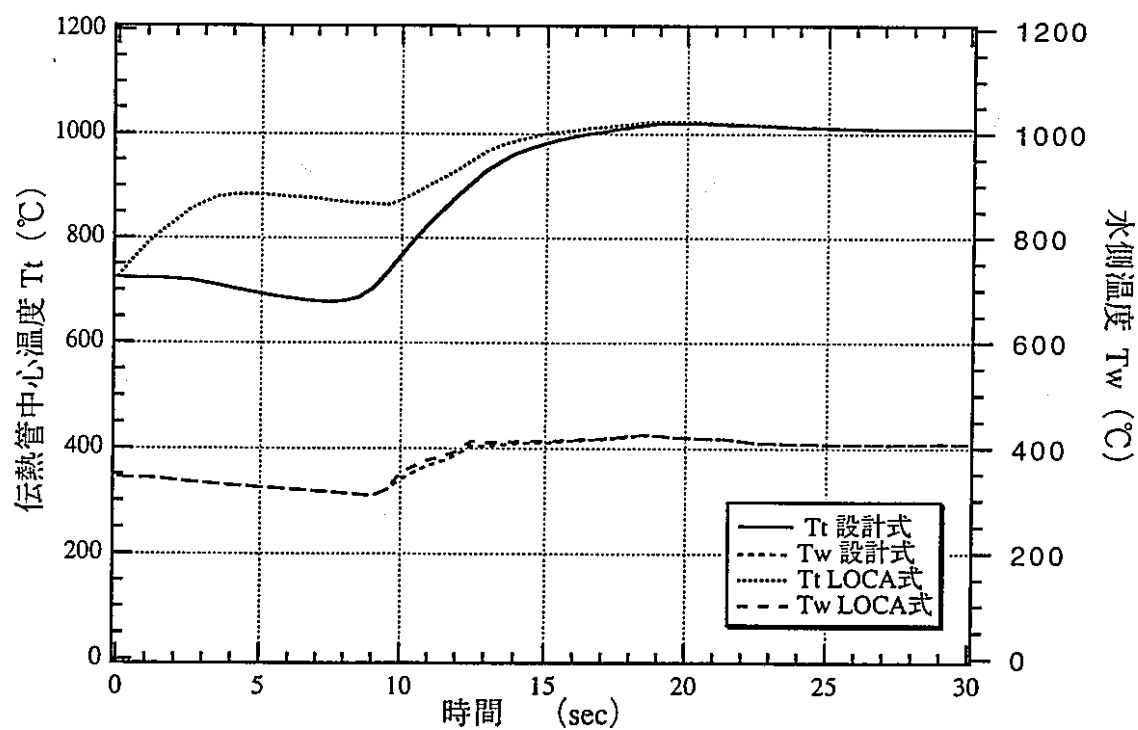
ケース3A (EV入口弁3B、EV出口弁 8B)

図3.4-44 伝熱管中心温度と水側温度 (EV リンク 8)



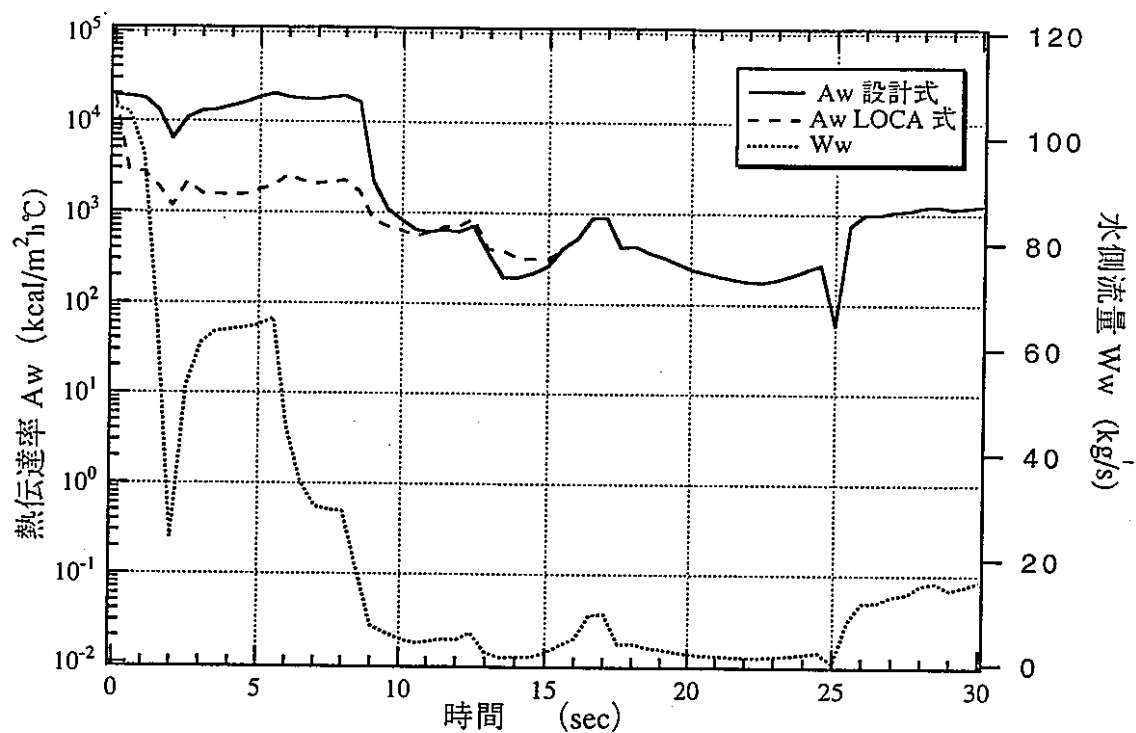


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

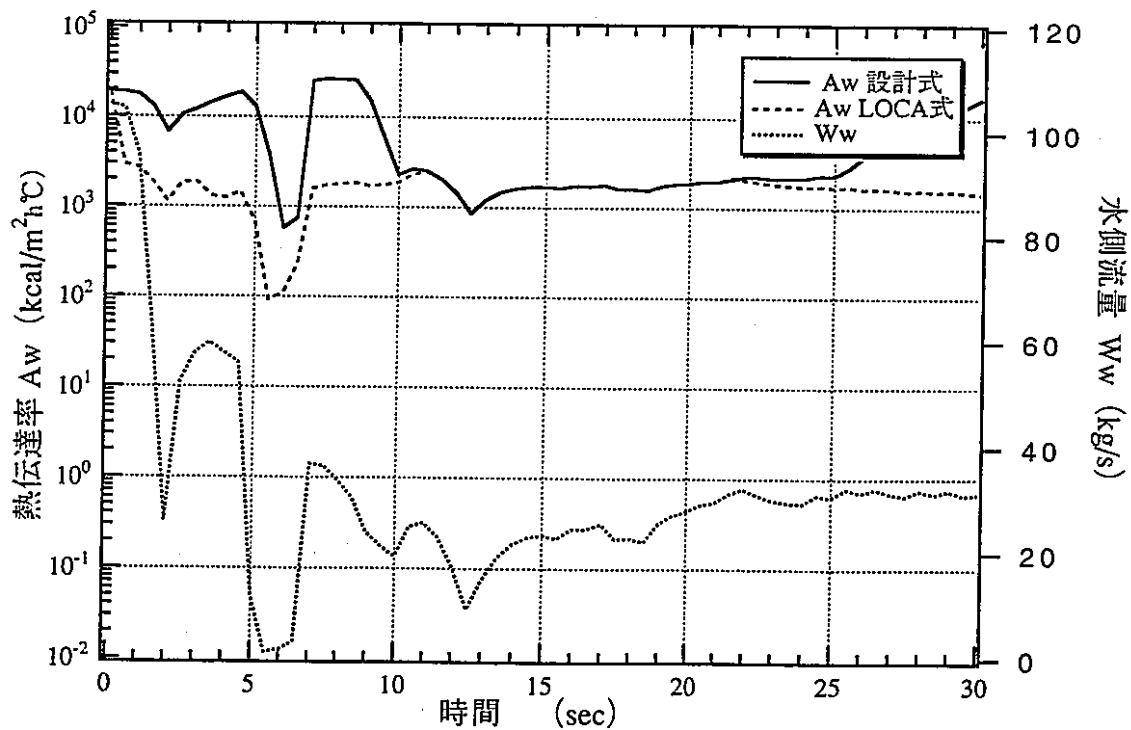


ケース3A (EV入口弁3B、EV出口弁 8B)

図3.4-45 伝熱管中心温度と水側温度 (EV リンク 9)

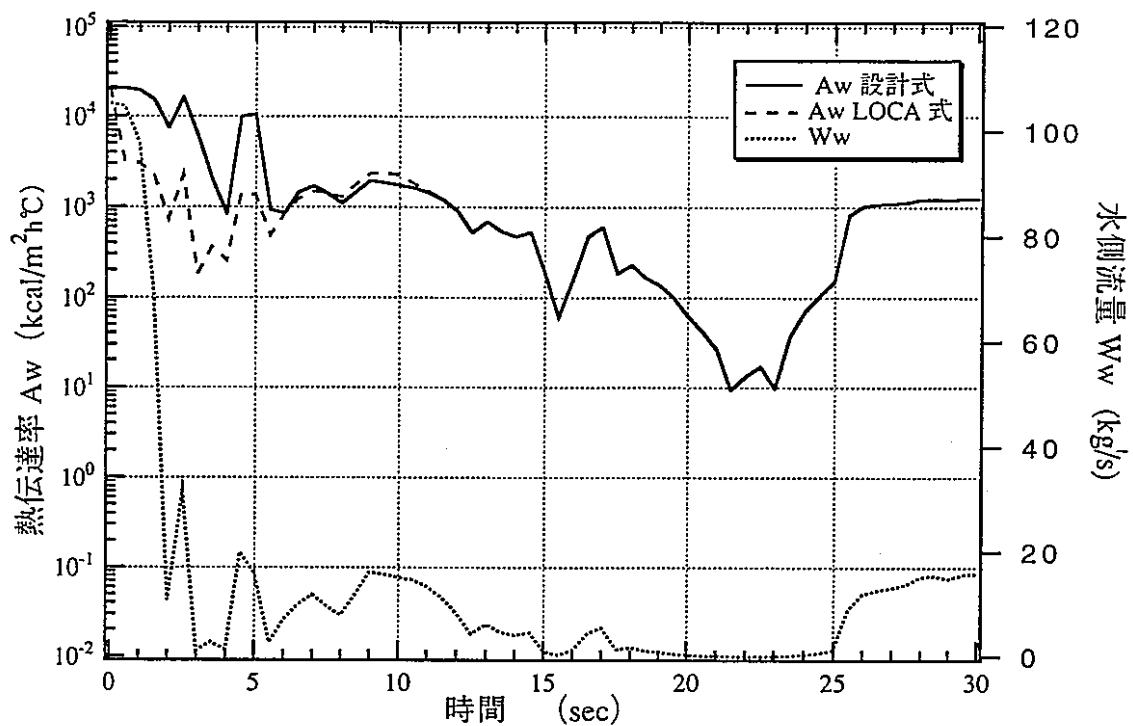


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

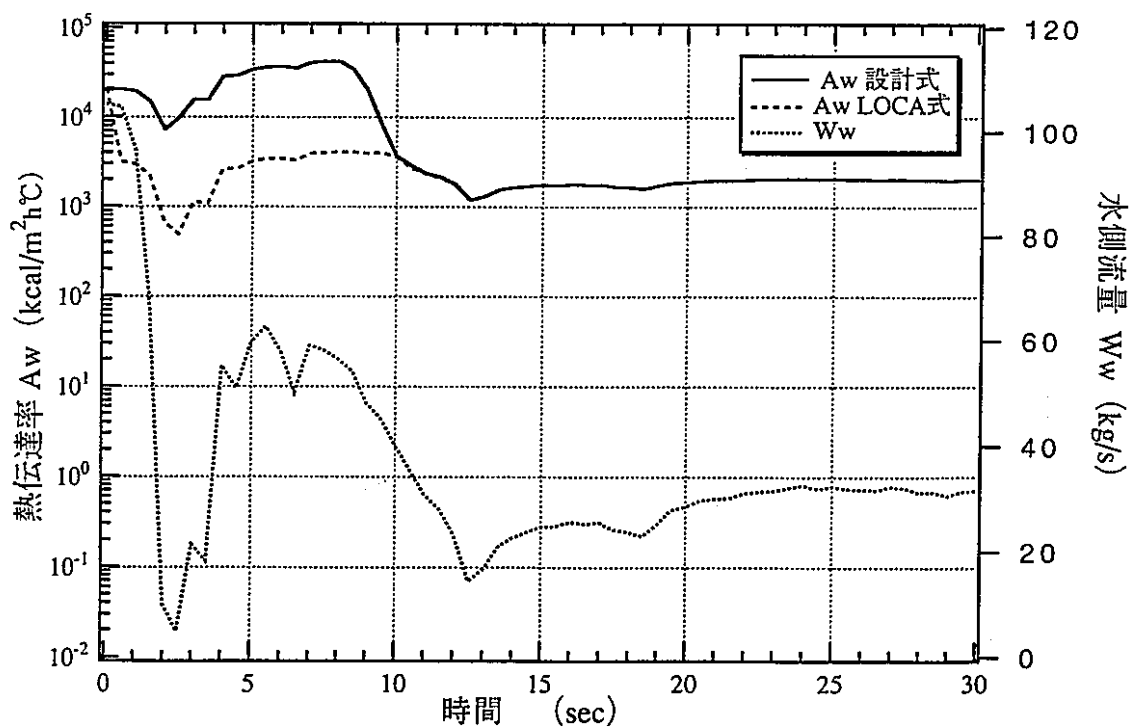


ケース3A (EV入口弁3B、EV出口弁 8B)

図3.4-46 水側熱伝達率と流量 (EVリンク 6)

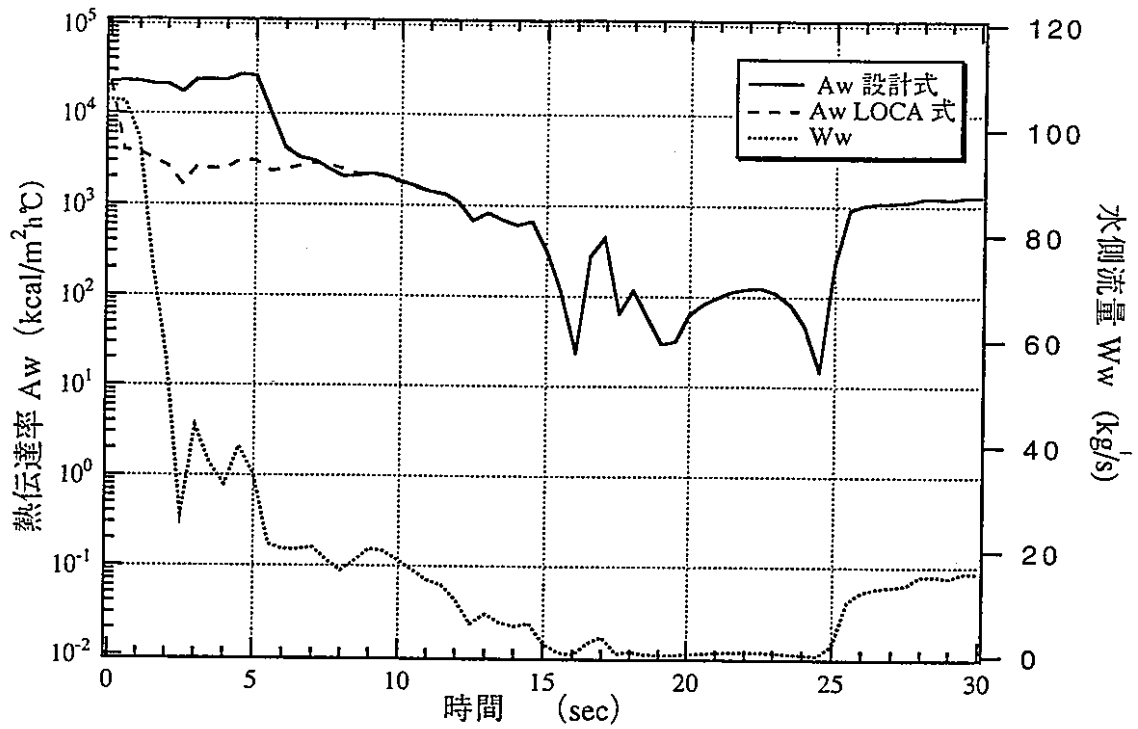


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

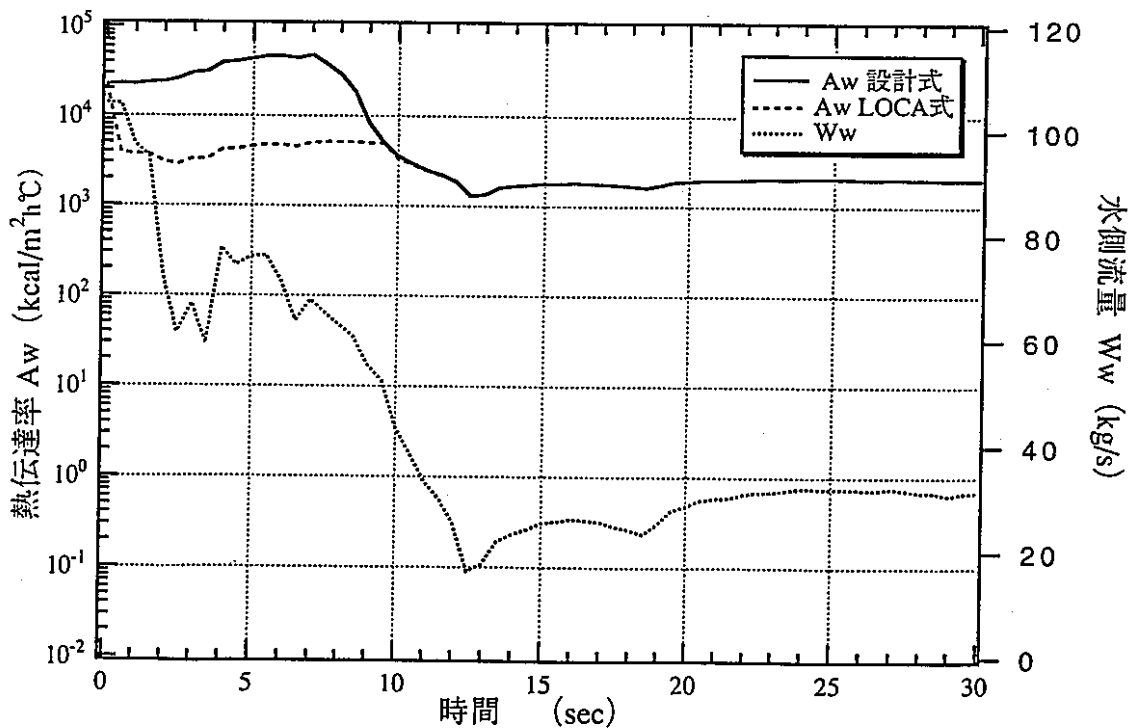


ケース3A (EV入口弁3B、EV出口弁 8B)

図3.4-47 水側熱伝達率と流量 (EV リンク 8)



ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)



ケース3A (EV入口弁3B、EV出口弁8B)

図3.4-48 水側熱伝達率と流量 (EVリンク9)

#### 4. RELAP5 / Mod.2 による水ブロー解析

第2章では、もんじゅ SG の定常／ブローダウン・パラメータ・サーベイ解析を、均質平衡二相流モデルを採用した解析コード BLOOPH により実施した。本章の目的は、非平衡・非均質モデルの汎用熱流動解析コード RELAP5 / Mod.2 を用い、定常計算及びブローダウン解析を実施し、ブローダウン解析に関する BLOOPH の結果との比較検討を行うことである。BROOPH と RELAP5 / Mod.2 の解析モデル比較表を添付資料 G に示す。

##### 4.1 解析条件

###### 4.1-1 使用コード

- (1) BLOOPH との比較に使用する解析コードは、非平衡、非均質流モデルの汎用熱流動解析コード RELAP5 / Mod.2 とする。RELAP5 / Mod.2 の概要は次の通り。

軽水炉過渡解析コード RELAP5 コードは、原子力安全性の研究に関して、幅広い事象に適用できる最新の最適予測コードを提供するため、米国原子力規制委員会(USNRC)の援助のもとに Idaho National Engineering Laboratory (INEL) で開発されてきた。

RELAP5 / Mod.2 コードの水力モデルは、水-蒸気系の二相混合流に対する一次元、過渡、二流体モデルである。

この二流体非平衡モデルの基礎式は、気液各相の連続の式、各相の運動量の式、各相のエネルギー式から成る。方程式は、時間と1次元空間座標を独立変数として、時間と体積平均従属変数の項からなる流路微分方程式の形で与えられる。

(熱伝達モデル)

RELAP5 / Mod.2 コードでは、熱伝達の式の選択をするために沸騰曲線を用いている。特に、熱伝達様式のモデルは pre-CHF、CHF、post-CHF という様に分類される。凝縮熱伝達もモデル化し、凝縮しない気体の効果もモデル化されている。

#### (臨界流モデル)

臨界流モデルは、Ransom と Trapp によって考案されており、配管破断やノズルでのシステムからの放出量の計算に適用するため RELAP5 / Mod.2 コードに組み込まれている。一般に破断箇所やノズルでの流れはシステムの圧力が格納容器圧力に近づくまで臨界流となる。臨界流モデルは流れが破断箇所やノズルで臨界流となるかどうか予測するために用いられ、もしそうならば、放出境界条件を確立するために使われる。加えて臨界流モデルは、系の内部点での臨界流の発生を予測したり、計算したりするのに用いられる。

#### 4.1.2 計算体系

解析対象体系は、蒸発器 (EV)、過熱器 (SH)、気水分離器、ブロータンクを含むもんじゅ SG とする。BLOOPH による解析と異なるのは、EV 入口放出弁より下流側のブロー配管及びブロータンクを含めている点である。これは RELAP5 の場合、これら配管・容器を容易に模擬できるため、ブロー配管途中 (ブロータンクへの出口部) での臨界流発生の有無を見る目的で、敢えて含めたものである。

初期定常状態は、定格出力時の表 4.1-1 に示す SG 運転条件とする。

#### 4.1.3 計算体系モデル

図 4.1-1 に解析モデルを示す。総ボリューム数は 85、総ジャンクション数は 76 (内バルブ 8) である。以下に本モデルの特徴を記す。

(1) 蒸発器 (EV)、過熱器 (SH) の伝熱管部は、結果の比較のため BLOOPH のノード分割と同じとした。

- ・ EV ダウンカマ                   :    2 ボリューム
- ・ EV コイル部                    :   12 ボリューム (コイル部 11、立上がり部 1)
- ・ SH ダウンカマ                   :    2 ボリューム
- ・ SH コイル部                    :    6 ボリューム (コイル部 5、立上がり部 1)

(2) EV 給水ヘッダ、EV 蒸気ヘッダ、SH 入口ヘッダ、SH 出口ヘッダは、独立したボリュームとした。

(3) 各大気放出弁、ブロー系ドレン弁は、モーターバルブで模擬し、弁開度

を時系列入力した。以下に各バルブの全開流路面積を示す。

|            |   |                                         |
|------------|---|-----------------------------------------|
| ・EV 入口放出弁  | ： | $A_{co}=1.18 \times 10^{-3} \text{m}^2$ |
| ・EV 出口ドレン弁 | ： | $A_{co}=1.8 \times 10^{-3} \text{m}^2$  |
| ・SH 出口ドレン弁 | ： | $A_{co}=1.8 \times 10^{-3} \text{m}^2$  |
| ・EV 出口放出弁  | ： | $A_{co}=4.36 \times 10^{-3} \text{m}^2$ |
| ・SH 入口放出弁  | ： | $A_{co}=3.94 \times 10^{-3} \text{m}^2$ |
| ・SH 出口放出弁  | ： | $A_{co}=4.41 \times 10^{-3} \text{m}^2$ |

(4) ブロー系はブロータンクまでの配管を考慮した。ブロータンクは圧力境界ボリュームとして、各ブロー系配管に1つずつ、計3つ配した。圧力損失は、エルボ (EL.) 1つにつき 0.2 とし、バルブ1つにつき 1.0 とした。以下にブロー系の諸データを示す。

#### EV 入口ブローライン

|               |   |                       |
|---------------|---|-----------------------|
| ・主給水管分岐～入口放出弁 | ： | 3Bsch160×20.0m、EL.数 9 |
| ・入口放出弁～ブロータンク | ： | 4Bsch40×99.8m、EL.数 19 |
| ・ブロータンク       | ： | 無限容量、5ata             |

#### EV 出口ブローライン

|              |   |                        |
|--------------|---|------------------------|
| ・ドレン弁～ブロータンク | ： | 4Bsch40×107.6m、EL.数 25 |
| ・ブロータンク      | ： | 無限容量、5ata              |

#### SH 出口ブローライン

|              |   |                       |
|--------------|---|-----------------------|
| ・ドレン弁～ブロータンク | ： | 4Bsch40×90.1m、EL.数 21 |
| ・ブロータンク      | ： | 無限容量、5ata             |

これらのデータのうち、EV 入口ブローラインの配管長、EL.数は入手できたアイソメ図（添付資料 H）より読み取った。EV 出口ブローライン、SH 出口ブローラインについては、データが入手できなかったため機器配置図より、配管ラインを想定し設定した。EL.数は EV 入口ブローラインの単位長さ当たりの EL.数を基に配管長さから設定した。（なお、EV 出口ドレン弁、SH 出口ドレン弁とも容量は比較的少なく、弁開速度も小さいためこのような設定が結果に及ぼす影響は小さいと考える。）

#### 4.1.4 境界条件

本解析の境界条件は、以下のように設定した。

- (1) 伝熱管熱構造材では、伝熱管外表面温度（＝BLOOPH による定常計算結果のナトリウム側温度分布）を境界条件とする。表 2.2 に伝熱管外表面温度を示す。
- (2) 流量境界として、給水止め弁位置の給水流量（ $3.79 \times 10^5 \text{ kg / h}$ ）、温度（ $240^\circ\text{C}$ ）を与える。
- (3) 圧力境界として、SH 出口逆止弁位置の主蒸気圧力（128ata）を与える。
- (4) ブロータンクは圧力境界ボリュームとし、その圧力は 5ata とした。
- (5) 大気圧は 1ata とした。

#### 4.1.5 壁面熱伝達モデル他

RELAP5 / Mod.2 の壁面熱伝達モデルを表 4.1-3 に示す。また、比較対象である BLOOPH の計算モデル図を図 4.1-2 に、計算式一覧を表 4.1-4 に示す。



表 4.1-1 SG 運転条件

| 項 目     | 単 位     | 定 格 出 力 |
|---------|---------|---------|
| Na 入口温度 | ℃       | 505     |
| Na 出口温度 | ℃       | 325     |
| Na 流量   | Ton / h | 3730    |
| 給水入口温度  | ℃       | 240     |
| 蒸気出口温度  | ℃       | 487     |
| 給水流量    | Ton / h | 379     |
| 蒸気出口圧力  | ata     | 133     |

表 4.1-2 伝熱管外表面温度

| E V      |         | S H      |         |
|----------|---------|----------|---------|
| 場 所      | 温 度 (℃) | 場 所      | 温 度 (℃) |
| ダウンカマ上部  | 259.7   | ダウンカマ上部  | 385.6   |
| ダウンカマ下部  | 253.0   | ダウンカマ下部  | 378.0   |
| 管束部下端    | 325.5   | 管束部下端    | 468.7   |
| 2        | 339.2   | 2        | 482.3   |
| 3        | 348.4   | 3        | 490.7   |
| 4        | 355.9   | 4        | 496.6   |
| 5        | 362.3   | 管束部上端    | 500.8   |
| 6        | 368.2   | ライザ立上がり部 | 503.8   |
| 7        | 375.7   |          |         |
| 8        | 385.6   |          |         |
| 9        | 399.0   |          |         |
| 1 0      | 417.0   |          |         |
| 管束部上端    | 441.3   |          |         |
| ライザ立上がり部 | 460.6   |          |         |

表4.1-3 壁面熱伝達モデル (RELAP5/Mod.2)

| 熱伝達様式                                                     |           | 熱伝達率相関式                              | 壁面熱伝達モデル                                                                                                                                 |
|-----------------------------------------------------------|-----------|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Pre-CHF                                                   | 液相单相強制対流  | Dittus-Boelter                       | $Q_{wg} = 0.0$ (壁面は完全に濡れている)<br>$Q_{wf} = h_{Dittus-Boelter} A_w (T_w - T_f) / V$                                                        |
|                                                           | サブクール核沸騰  | 修正 Chen                              | $Q_{wg} = 0.0$ (壁面は完全に濡れている)<br>$Q_{wf} = (h_{mlc} \cdot \Delta T_{sat} + h_{mac} (T_w - T_f)) A_w / V$                                  |
|                                                           | 飽和核沸騰     | Chen                                 | $Q_{wg} = 0.0$ (壁面は完全に濡れている)<br>$Q_{wf} = h_{wf} \cdot A_w (T_w - T_f) / V$                                                              |
| CHF                                                       | 高流量 CHF   | Biasi                                | $Q_{wg} = 0.0$ (壁面は完全に濡れている)<br>$Q_{wf} = q_{crit} \cdot A_w / V$                                                                        |
|                                                           | 低流量 CHF   | 修正 Zuber                             |                                                                                                                                          |
| Post-CHF                                                  | 遷移膜沸騰     | Chen                                 | $Q_{wg} = q_{vc} \cdot A_{wg} / V + q_{rad,g} (A_{wg})_{rad} / V$<br>$Q_{wf} = q_{crit} \cdot A_{wf} / V + q_{rad,g} (A_{wf})_{rad} / V$ |
|                                                           | 膜沸騰       | Bromley-Pomeranz<br>Dougall-Rohsenow | $Q_{wg} = q_{DPG} \cdot A_{wg} / V + q_{rad,g} (A_{wg})_{rad} / V$<br>$Q_{wf} = q_{film} \cdot A_{mf} / V$                               |
|                                                           | 気相单相強制対流  | Dittus-Boelter                       | $Q_{wg} = h_{wg} \cdot A_w (T_w - T_g) / V$<br>$Q_{wf} = 0.0$ (壁面は乾燥している)                                                                |
| 凝縮                                                        | 低ボイド率流の凝縮 | Dittus-Boelter<br>凝縮熱伝達              | $Q_{wf} = ((1 - \alpha_g) h_{Dittus-Boelter} (T_w - T_f) + \alpha_g \cdot h_{con} (T_w - T_g)) A_w / V$                                  |
|                                                           | 高ボイド率流の凝縮 | 凝縮熱伝達                                | $Q_{wg} = (\alpha_g \cdot h_{con} (T_w - T_g)) A_w / V$                                                                                  |
| $A_w$ : 全伝達面積 $A_{wf}$ : 液相に接する伝熱面積 $A_{wg}$ : 気相に接する伝熱面積 |           |                                      |                                                                                                                                          |

表4.1-4 解析コード BLOOPH の使用モデル、計算式一覧

|                            |                                                        |                    |
|----------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------|
| 1. 基礎物理式                   |                                                        |                    |
| 水 / 蒸気側                    | エネルギー式                                                 |                    |
| 〃                          | 連続の式                                                   |                    |
| 〃                          | 運動方程式                                                  |                    |
| ナトリウムのエネルギー式               |                                                        |                    |
| 伝熱管及びその他の構造材のエネルギー式        |                                                        |                    |
| 2. 熱伝達式                    | ( $X_{DNB}=0.75$ )                                     | ( $X_{DNB}=0.95$ ) |
| 沸騰域 *                      | 修正 Schrock-Grossman, Rohsenow の式                       |                    |
| サブクール域, 過熱域                | ヘルカル部                                                  | 森・中山の式             |
|                            | 直管部                                                    | Dittus-Boelter の式  |
| Na 側                       | Hoe の式                                                 |                    |
| 3. 流動パラメータ                 |                                                        |                    |
| マサツ損失係数                    | Colebrook の式                                           |                    |
| 二相圧損増倍係数                   | Martinelli-Nelson の式                                   |                    |
| 形状抵抗                       | 一 定                                                    |                    |
| 4. 形状式                     |                                                        |                    |
| 水 側                        | 圧力及び温度についてのテーブル形式<br>(ASMEデータ基準)                       |                    |
| Na 側                       | Thermophysical Properties of Sodium<br>ANL-7323 (1967) |                    |
| 5. 臨界流量計算                  |                                                        |                    |
| 2 相                        | Moody モデル                                              |                    |
| 水単相                        | Henry-Fauskeモデル                                        |                    |
| 蒸気単相                       | 断熱噴流モデル                                                |                    |
| 弁部及び各流路内の流量は、各臨界流量で制限している。 |                                                        |                    |

\*Rohsenow の式を選択

( $X_{DNB}=0.95$ )

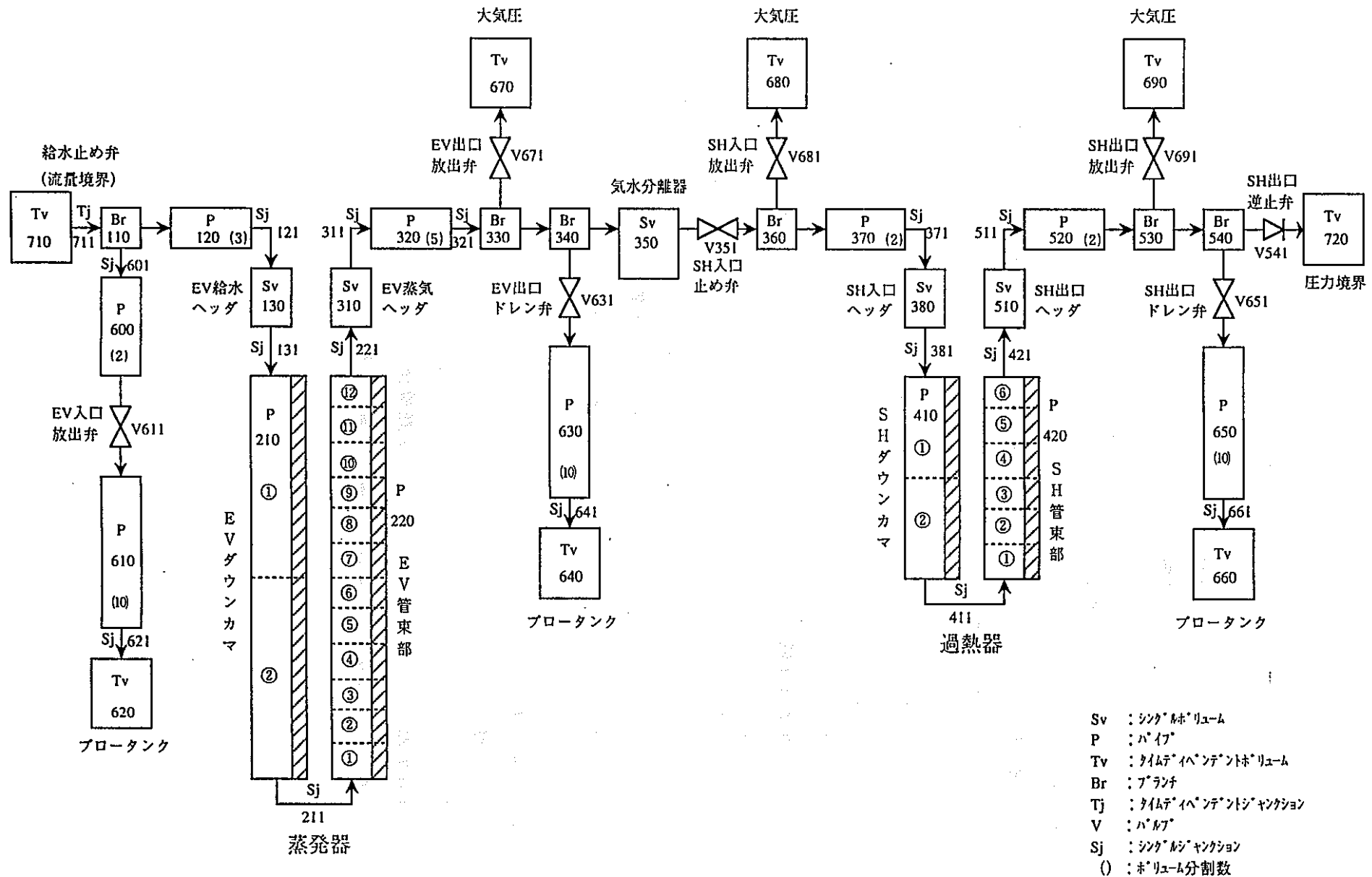


図4.1-1 もんじゅ SG ブローダウン解析モデル (RELAP5/Mod.2)

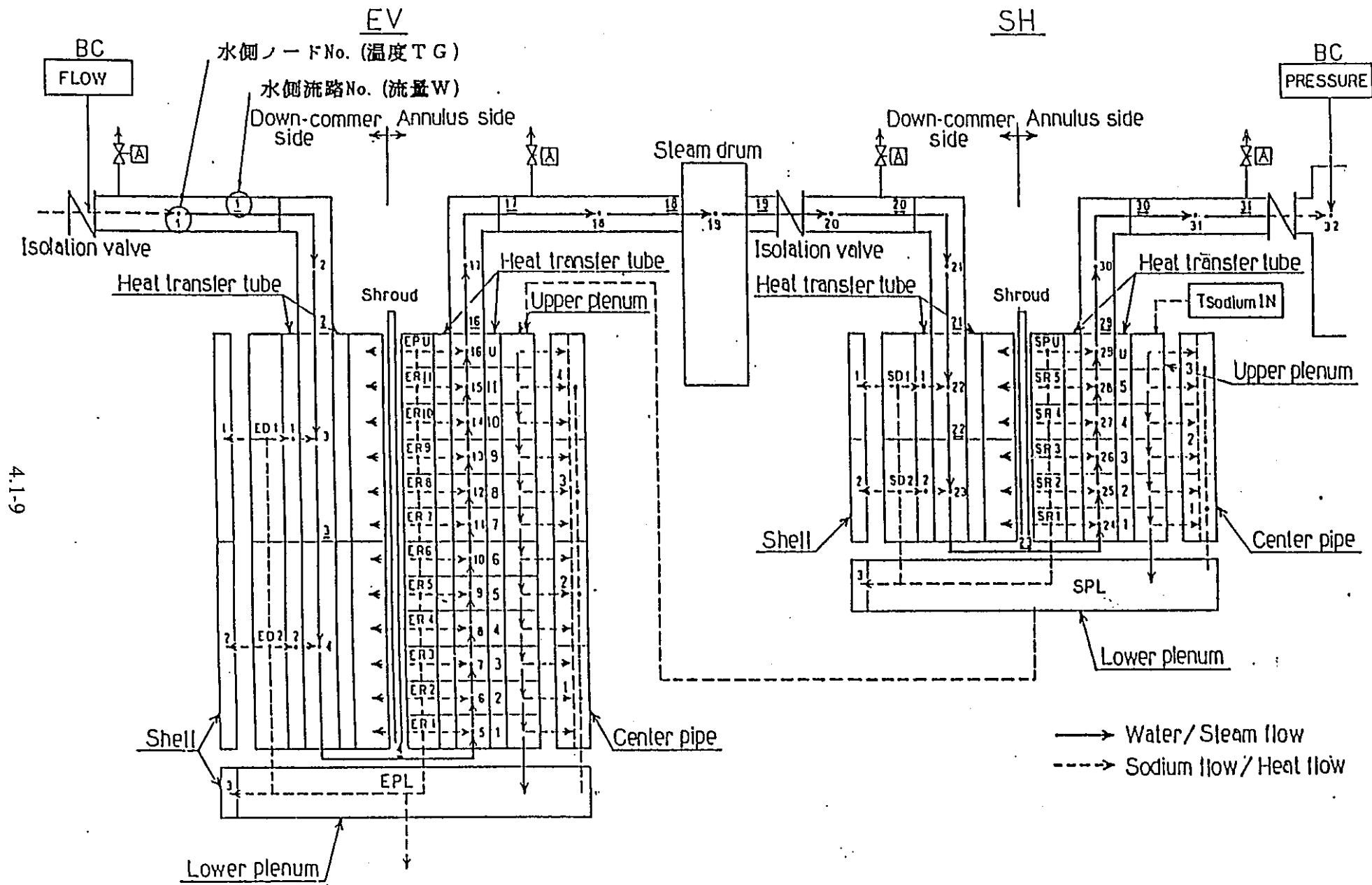


図4.1-2 "BLOOPH" コードの計算モデル (水側ノード、流路番号の対応)

## 4.2 定常計算

初期定常状態は定格の熱交換量、水側出入口圧力を合わせることにした。RELAP5/Mod.2は流路を直管として想定しているが、本解析対象であるもんじゅSGの伝熱管はヘリカルコイル状であり、旋回流の効果で圧力損失が増大、伝熱性能が向上する。このため、圧力損失係数と伝熱面積補正係数をパラメータとしたサーベイ計算を実施し、それぞれの値を取り決めた。

### 4.2.1 旋回流効果の検討

#### (1) 水側の出入口の差圧

ヘリカルコイル型の伝熱管では、旋回流による2次流れが生じ、圧力損失が増大することが知られている。以下の伊藤の式で評価すると、定格状態では、SGコイル部圧力損失は、直管相当の1.2～1.3倍程度の増大となる。この増大相当分を、形状損失係数値でコイル部に入力することとした。

伊藤の式

$$\frac{\lambda_c}{\lambda_s} = \left[ \text{Re} \left( \frac{a}{R} \right)^2 \right]^{1/20}$$

$\lambda_c$  : ヘリカルコイル管の管摩擦係数

$\lambda_s$  : 直管の管摩擦係数

$\text{Re}$  : レイノルズ数

$a$  : 管内径

$R$  : コイル巻き径

しかし、この式から得られた値をそのまま入力しても、圧力分布の良い一致は見られなかった。そこで、この圧力損失係数をパラメータとしたサーベイ計算を行った結果、圧力損失係数をEVヘリカルコイル部で大きく(2倍)、SHヘリカルコイル部で小さく(1/9倍)したものがBLOOPH圧力分布とよく一致した。表4.2-1にBLOOPHと圧力分布が良く一致したケースのRELAP5/Mod.2のSG各部の圧力損失係数を示す。

## (2) 伝熱性能

RELAP5 / Mod.2 は直管対象で伝熱計算される。そこで、旋回流による伝熱性能の上昇分として、伝熱面積を 1.1 倍することとした。

### 4.2.2 定常計算結果

以下の図に定常計算結果をまとめた。また、表 4.2-2 に熱交換量を示す。

|             |           |
|-------------|-----------|
| 水側圧力分布図     | : 図 4.2-1 |
| 水側温度分布図 (*) | : 図 4.2-2 |
| 水側熱伝達係数分布図  | : 図 4.2-3 |
| 水側クオリティ分布図  | : 図 4.2-4 |

注 (\*) 温度計算式  $T = (1-X) \cdot T_f + X \cdot T_g$

T: 混合温度、 $T_f$ : 液相温度、 $T_g$ : 気相温度、X: クオリティ

図 4.2-2 の温度分布は最大で 10℃程度の温度差が見られる。これは、図 4.2-3、図 4.2-4 からわかるように、EV 管束部後半の高クオリティ域で、RELAP5 / Mod.2 による計算ではドライアウトしてしまい、熱伝達性能が低くなることによる。したがって、表 4.2-2 に示したように熱交換量に誤差が生じるが、これらの差は RELAP5 / Mod.2 の流路が直管であることに起因する。しかし、図 4.2-1 から圧力分布は BLOOPH とおおよそその一致が得られたことがわかる。

表 4.2-3 に BLOOPH と RELAP5 / Mod.2 の EV ヘリカルコイル部保有水量の比較を示す。

全計算体系の保有水量は

BLOOPH : 5570.15kg

RELAP : 5603.02kg

であり、その誤差は 0.6%である。ただし、RELAP は BLOOPH では模擬していない各ブロー系配管のインベントリも含む。

表 4.2-1 BLOOPH と RELAP5 / Mod.2 の抵抗係数

|              | BLOOPH | RELAP5/Mod.2 |      |
|--------------|--------|--------------|------|
|              | 0.0    | 1.73         | 逆流   |
| EV 給水ヘッダ前    | 1.73   | 0.5          | 1.23 |
| EV 給水ヘッダ後    | 0.0    | 0.5          | 1.0  |
| EV 折り返し部     | 2.0    | 7.0          | 0.5  |
| EV ヘリカルコイル部  | 3.5    | 2.0          | 7.0  |
| EV ライザ立ち上がり部 | 2.0    | 1.0          | 2.0  |
| EV 蒸気ヘッダ前    | 0.0    | 0.6          | 0.5  |
| EV 蒸気ヘッダ後    | 0.6    | 0.6          | 1.1  |
| セパレータ前       | 0.6    | 0.9          | 0.1  |
| セパレータ後       | 0.9    | 0.9          | 1.4  |
| SH 入口ヘッダ前    | 0.9    | 0.5          | 0.4  |
| SH 入口ヘッダ後    | 0.0    | 0.0          | 1.0  |
| SH 折り返し部     | 0.0    | 0.2          | 0.0  |
| SH ヘリカルコイル部  | 0.0    | 0.0          | 0.2  |
| SH ライザ立ち上がり部 | 0.0    | 1.0          | 0.0  |
| SH 出口ヘッダ前    | 0.0    | 2.3          | 0.5  |
| SH 出口ヘッダ後    | 2.3    | 11.0         | 2.8  |
| SH 出口逆止弁     | 11.0   |              | 11.0 |

表 4.2-2 定常熱交換量 (MW)

|       | 設 計 条 件 | RELAP5 / Mod.2 (誤差) |
|-------|---------|---------------------|
| EV    | 190.8   | 181.2 (-5.0%)       |
| SH    | 47.2    | 53.0 (+12.3%)       |
| SG 全体 | 238.0   | 234.3 (-1.6%)       |



表 4.2-3 BLOOPH と RELAP の EV ヘリカルコイル部保有水量比較 (kg)

| EVコイル部<br>ボリューム番号 | BLOOPH  |        | RELAP   |        |
|-------------------|---------|--------|---------|--------|
|                   | 液相質量    | 気相質量   | 液相質量    | 気相質量   |
| 1                 | 329.49  | 0.00   | 326.10  | 0.00   |
| 2                 | 253.92  | 0.00   | 250.49  | 0.00   |
| 3                 | 240.55  | 0.00   | 236.42  | 0.00   |
| 4                 | 228.16  | 0.00   | 223.21  | 0.00   |
| 5                 | 214.50  | 0.00   | 159.51  | 8.92   |
| 6                 | 137.16  | 12.33  | 99.71   | 18.41  |
| 7                 | 81.13   | 21.42  | 61.23   | 23.42  |
| 8                 | 44.77   | 27.13  | 43.71   | 26.59  |
| 9                 | 20.37   | 30.71  | 26.61   | 29.19  |
| 10                | 3.74    | 32.86  | 9.60    | 31.85  |
| 11                | 0.00    | 27.98  | 1.76    | 28.44  |
| 12                | 0.00    | 25.53  | 0.47    | 26.26  |
| EVコイル部合計          | 1553.79 | 177.94 | 1438.81 | 193.08 |
| 液相気相合計            | 1731.73 |        | 1631.89 |        |

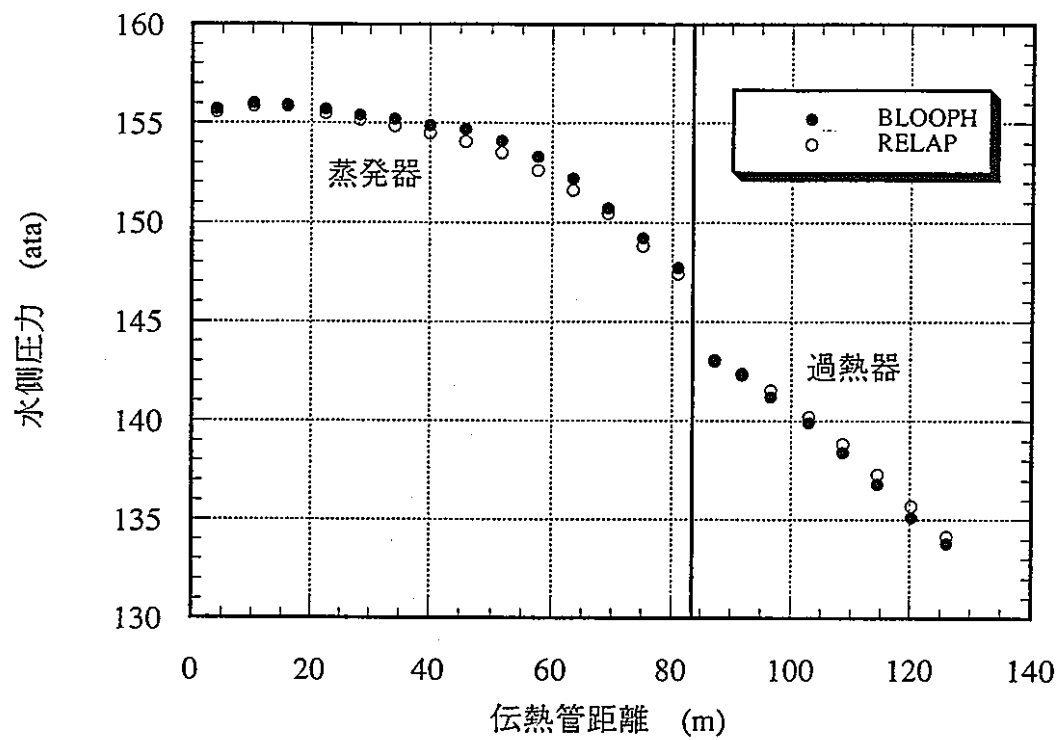


図4.2-1 BLOOPH とRELAPの定常水側圧力比較

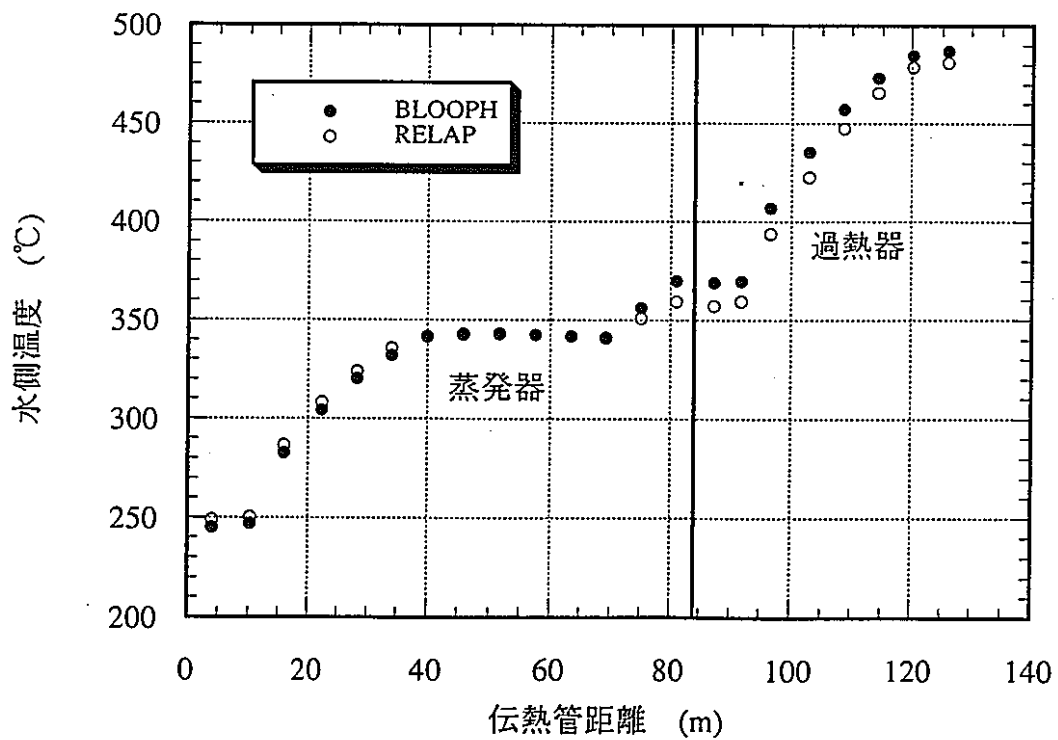


図4.2-2 BLOOPH とRELAPの定常水側温度比較

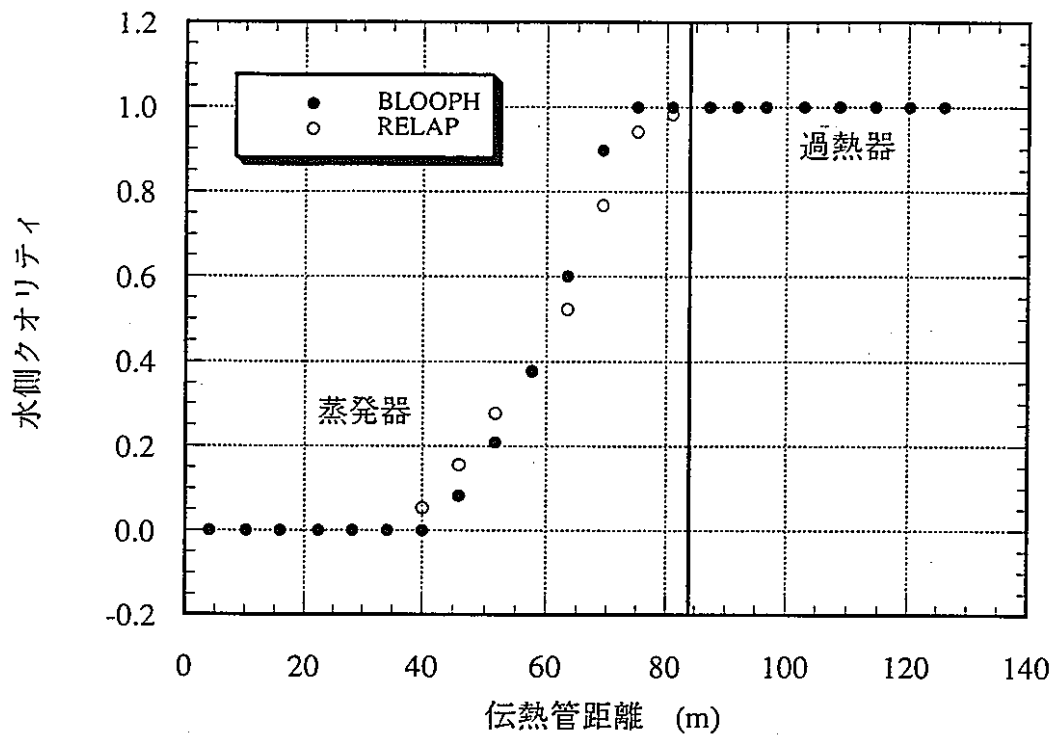


図4.2-3 BLOOPH とRELAPの定常水側クオリティ比較

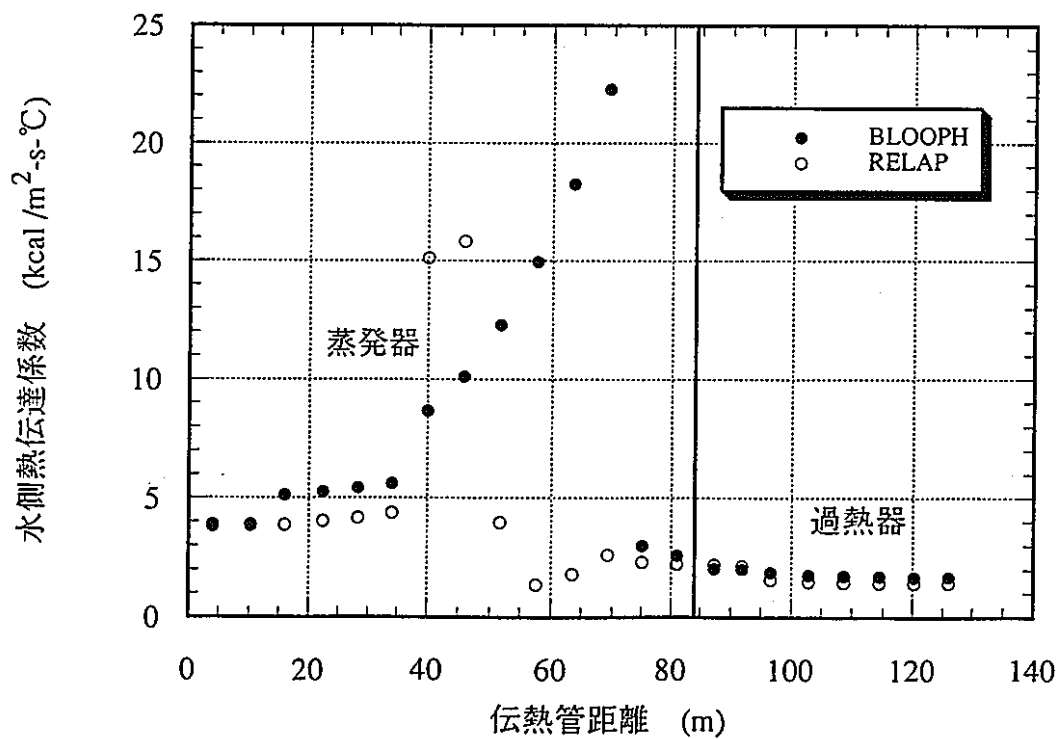


図4.2-4 BLOOPH とRELAPの定常水側熱伝達係数比較

### 4.3 水ブロー解析

100% 定格出力運転状態からの水ブロー解析を行い、BLOOPH と RELAP5 / Mod.2 による解析結果の違いを比較・検討する。

#### 4.3.1 計算条件

以下の条件で RELAP5 / Mod.2 による水ブロー解析を行った。特に BLOOPH と異なる点は、比較して記した。

##### (1) 運転条件・操作に関する条件

- 1) 時刻 0sec まで体系は定格条件で運転されているとする。
- 2) 時刻 0sec で急速ブローを開始する。
- 3) 給水流量テーブルは、BLOOPH の定格運転状態からのブローダウン解析に用いたものと同じものを使用する。給水温度は 240℃で一定とする。図 4.3-1 に給水流量を示す。
- 4) 各弁の作動状況は、水リークスイッチ ON 後、1 秒遅れて給水遮断、SH 入口止弁閉、EV 入口放出弁開、EV 出口放出弁開、SH 入口放出弁開、SH 出口放出弁開、2 秒遅れて SH 出口ドレン弁開、SH 入口止弁閉後 1 秒遅れて EV 出口ドレン弁開である。図 4.3-2 に各弁の開度特性を図示する。
- 5) SH 入口止弁の流量は、BLOOPH と同様に、動燃殿より供与された流量特性データに基づいて、流量係数  $C_v$  を取り決めた。表 4.3-1 に SH 入口止弁流量特性データを示す。
- 6) 主要解析条件を表 4.3-2 に示す。

##### (2) 計算モデルに関する条件

- 1) 水/蒸気は非均質・非平衡モデルとする。
- 2) 臨界流は非均質流モデルとする。
- 3) 各放出弁の呼び径は以下の通りとする。

- 4) 各放出弁の放出係数は、BLOOPH では全て 0.6 であった。これは、50MW の SG で既に検証されている。しかし、RELAP5 / Mod.2 の場合 FBR 実機 SG への適用は初めてであり、検証された流出係数は定まっていない。今回は両者の流動モデルの違いによるブロー中の SG 伝熱管内流動の差異を見ることを主眼として RELAP5 / Mod.2 による解析では、BLOOPH と放出流量を合わせることとした。放出係数をパラメータとしたサーベイ計算を実施し、流出係数を設定した。表 4.3-4 に設定した各放出弁の流出係数を示す。
- 5) Na 側温度は定常計算と同様、BLOOPH の定常計算結果の Na 温度分布を、伝熱管表面温度として用いる。なお、RELAP5 のモデル上の制約から本解析では Na 側温度は解かず、一定値として扱った。

#### 4.3.2 計算結果

計算結果を BLOOPH と RELAP5 / Mod.2 で比較して、以下の図に示す。

- 図 4.3-3 : SH 入口止弁流量変化
- 図 4.3-4 : SG 出入口放出弁流量変化
- 図 4.3-5 : SG 出入口圧力変化
- 図 4.3-6 : EV コイル下部流量変化
- 図 4.3-7 : EV コイル上部流量変化
- 図 4.3-8 : EV コイル下部温度変化
- 図 4.3-9 : EV コイル上部温度変化
- 図 4.3-10 : EV コイル下部クオリティ変化
- 図 4.3-11 : EV コイル上部クオリティ変化
- 図 4.3-12～図 4.3-23 : EV コイル熱伝達係数変化

#### 4.3.3 検討

##### (1) EV 水側全般挙動

解析条件より、水リーク信号発信から 1sec 後に水ブロー、SG 隔離が開始する。ブロー開始後、EV 入口放出弁および EV 出口放出弁は 1～2sec で全開となり、ブロー流量は急激に増大しピークに達する。この時点でのブロー流

量は、EV 入口で定格時給水流量とほぼ同じ、EV 出口は定格時蒸気流量の約半分である。一方、EV 入口止弁、SH 入口止弁は 5sec で全閉となる。特に、EV 入口側からの急速ブローに伴い、水側加圧水部は EV 入口から急速に逆流に転ずる。しかしながら、二相部では減圧により沸騰が促進されるだけで逆流には至らない。したがって、より下流側の過熱蒸気部は、流量は急減するものの正流を維持する。

EV 出入口からのブローの効果により、EV 内圧力は急減するが、これに伴い、伝熱管内沸騰部の位置は、初期加圧水状態の EV 給水入口ヘッダおよび給水管へと移動する。ブロー開始から 30～40sec 後以降この辺りの沸騰が挙動を支配し、圧力減少も比較的緩慢となる。また、この沸騰部は圧力源となるため、これの給水入口側への移動に伴い、これより下流側の初期加圧水部で反転していた流動は、再び流れの方向を変え正転する。

EV 内圧力は 30～40sec から比較的緩慢な降下となるが、ブロー開始後 100sec には約 13ata となる。

## (2) BLOOPH と RELAP5 / Mod.2 の解析結果の差異

- (a) BLOOPH と RELAP5 / Mod.2 の SG 入口流量及び SG 出入口放出弁流量は、ほぼ同一にすることができた（図 4.3-3、図 4.3-4）。
- (b) 各ブローラインの弁およびブロータンク入口では、臨界流であることをメジャーエディットから確認した。したがって、各放出弁の放出係数を BLOOPH と同一にできなかったのは、臨界流モデルの違いに起因するものであって、ブローライン配管の付加によるものではないと推察する。逆に言えば、今回解析対象とした実機 SG 体系に対しては、BLOOPH の様にブローラインをモデル化していない計算体系でも、モデル化している計算体系と同等の結果が得られるといえる。（ブローラインがもっと長い場合には、ブロータンク入口での臨界流が弁下流の圧力、更には弁の臨界流に影響を及ぼし、SG 内圧力等、ブロー挙動全般に影響してくることも考えられる。）
- (c) 図 4.3-5 から、圧力変化も BLOOPH と RELAP5 / Mod.2 で、ほぼ同等の結果が得られたことがわかる。SH 出入口の最終的な圧力が異なるのは、給水ヘッダ圧力が 9kg/cm<sup>2</sup>a 以下になると N<sub>2</sub> ガスでパージされることを、RELAP5 / Mod.2 では模擬していないためである。EV 出入口で、25 秒付近ま

で RELAP5 / Mod.2 の方が圧力降下が早く、その後は逆に、より緩慢になるのは、EV 入口放出弁の臨界流モデル及び伝熱管における伝熱モデルの違いが主要因と思われる。

- (d) EV 内流量変化は、BLOOPH と RELAP5 / Mod.2 で同様の傾向を示しているが、解析時間前半では、RELAP5 / Mod.2 の流量が少ない。また、流量がほぼ 0kg/s となる時間も RELAP5 / Mod.2 の方が長いようである（図 4.3-6、図 4.3-7）。
- (e) EV 内水側温度変化は、BLOOPH、RELAP5 / Mod.2 とともに、コイル下部（図 4.3-8）で 20～30sec に急激な温度上昇をし、コイル上部（図 4.3-9）ではブロー直後～10sec 以内に急上昇する。しかし、ブロー後 100sec での温度は、BLOOPH が全ての点で高く、特にコイル下部でその傾向は著しい。
- (f) EV 内クオリティ変化（図 4.3-10、図 4.3-11）で、解析時間 0sec のクオリティが異なるのは、定常状態で同じクオリティ分布が得られなかったためである。BLOOPH では上部より順にクオリティ 1.0 となっていくが、RELAP5 / Mod.2 では必ずしもそうではない。解析時間 40～70sec 辺りで BLOOPH はコイル最下端部のクオリティが低下しているが、RELAP5 / Mod.2 では 80sec 過ぎから更に大きく下がって、100sec では液単相に近い。対向流を含む RELAP5 の流動モデルの特徴が現われたものと考えられる。
- (g) EV コイル部熱伝達係数変化は、全般的によく一致した傾向を示す。しかし、コイル下部（図 4.3-12、図 4.3-13）では解析時間中盤（40～80sec）、コイル中部（図 4.3-18～図 4.3-21）では解析時間初期（0～10sec）で RELAP5 / Mod.2 の方が低い。ただし、この解析時間初期の違いは、定常状態での差異である。コイル下部の解析時間中盤では、RELAP5 / Mod.2 の方がクオリティが低いにも係わらず熱伝達係数が低い結果となっている。この時点での流量には大差ないことから、熱伝達モデルの相違（特にドライアウト・クオリティ）が、両者の差異となっていると考えられる。

表 4.3-1 SH 入口止弁流量特性

| BLOOPH   |                        | RELAP5 / Mod.2 |                      |
|----------|------------------------|----------------|----------------------|
| 時間 (sec) | 抵抗係数 $\zeta$           | 規格化ステム位置       | 流量係数 $C_v$           |
| 0.0      | 0.0                    | 1.0            | 3450                 |
| 1.0      | 0.7232                 | 1.0            | 3450                 |
| 1.5      | —                      | 0.9            | 3312                 |
| 2.0      | 0.9339                 | 0.8            | 3.36                 |
| 2.5      | 1.286                  | 0.7            | 2587.5               |
| 3.0      | 2.078                  | 0.6            | 2035.5               |
| 3.5      | 3.912                  | 0.5            | 1483.5               |
| 4.0      | 8.600                  | 0.4            | 1000.5               |
| 4.5      | 25.03                  | 0.3            | 586.5                |
| 5.0      | 200.9                  | 0.2            | 207.0                |
| 5.5      | 7232                   | 0.1            | 34.5                 |
| 6.0      | $8.608 \times 10^{18}$ | 0.0            | $1.0 \times 10^{-6}$ |

BLOOPH の 1.5 秒のデータが入力されていないのは、入力データ数の制限による。

表 4.3-3 SG 出入口放出弁呼び径

|           |     |
|-----------|-----|
| EV 入口放出弁  | 3 B |
| EV 出口放出弁  | 4 B |
| EV 出口ドレン弁 | 4 B |
| SH 入口放出弁  | 4 B |
| SH 出口放出弁  | 4 B |
| SH 出口ドレン弁 | 4 B |



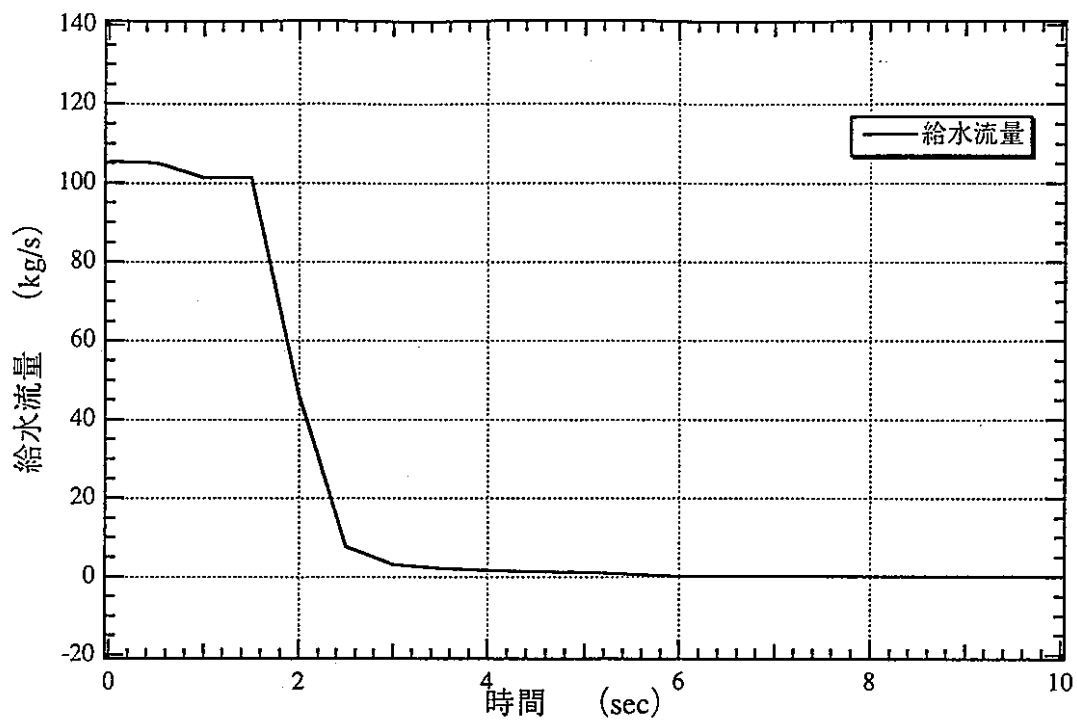
表4.3-2 蒸気発生器伝熱管小破損時水ブロー解析条件

|               |                                                                                                                                                                                                  |           |             |                                       |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-------------|---------------------------------------|
| 事象の概要         | Bループの蒸発器で水リークが発生し、Na中水素濃度上昇高々等により、Bループカクリ2次ポンプトリップ(2.0sec)→原子炉トリップとなる。解析は、水リークスイッチONから開始し、1sec遅れて給水しゃ断、SH出口止弁閉、SH入口止弁閉、EV入口放出弁、EV出口放出弁、SH入口放出弁、SH出口放出弁、2sec遅れてSH出口ドレン弁開、SH入口止弁閉後1sec遅れてEV出口ドレン弁開 |           |             |                                       |
|               | 初期条件                                                                                                                                                                                             | 100%出力    | 解析使用弁名      | 弁作動状況(図4.3-2 参照)                      |
| ナトリウム側        | SG入口流量                                                                                                                                                                                           | 1036 kg/s | EV入口止弁      | 1~6secで閉止                             |
|               | SH入口温度                                                                                                                                                                                           | 505 °C    | SH出口止弁      | 1~133secで閉←逆止弁がはやいのでむし                |
|               | SH出口温度                                                                                                                                                                                           | 469 °C    | EV入口放出弁     | 1~2secで全開 $Aco=1.18 \times 10^{-3}$   |
|               | EV入口温度                                                                                                                                                                                           | 469 °C    | EV出口ドレン弁    | 7~43secで全開 $Aco=1.8 \times 10^{-3}$   |
|               | EV出口温度                                                                                                                                                                                           | 325 °C    | EV出口放出弁     | 1~1.3secで全開 $Aco=4.36 \times 10^{-3}$ |
|               |                                                                                                                                                                                                  |           | SH入口放出弁     | 1~1.3secで全開 $Aco=3.94 \times 10^{-3}$ |
| 水・蒸気側         | 給水流量                                                                                                                                                                                             | 1053 kg/s | SH出口放出弁     | 1~1.3secで全開 $Aco=4.41 \times 10^{-3}$ |
|               | 給水温度                                                                                                                                                                                             | 240 °C    | SH出口ドレン弁    | 2~38secで全開 $Aco=1.8 \times 10^{-3}$   |
|               | EV出口温度                                                                                                                                                                                           | 369 °C    | 気水分離器ドレン弁   |                                       |
|               | SH入口温度                                                                                                                                                                                           | 367 °C    | SH入口止弁出口放出弁 |                                       |
|               | SH出口温度                                                                                                                                                                                           | 487 °C    | EV出口安全弁     |                                       |
|               | 主蒸気温度                                                                                                                                                                                            | 483 °C    | SH出口安全弁     |                                       |
| SG廻り解析関連系統説明図 |                                                                                                                                                                                                  |           | SH出口逆止弁     | 逆流後閉止                                 |

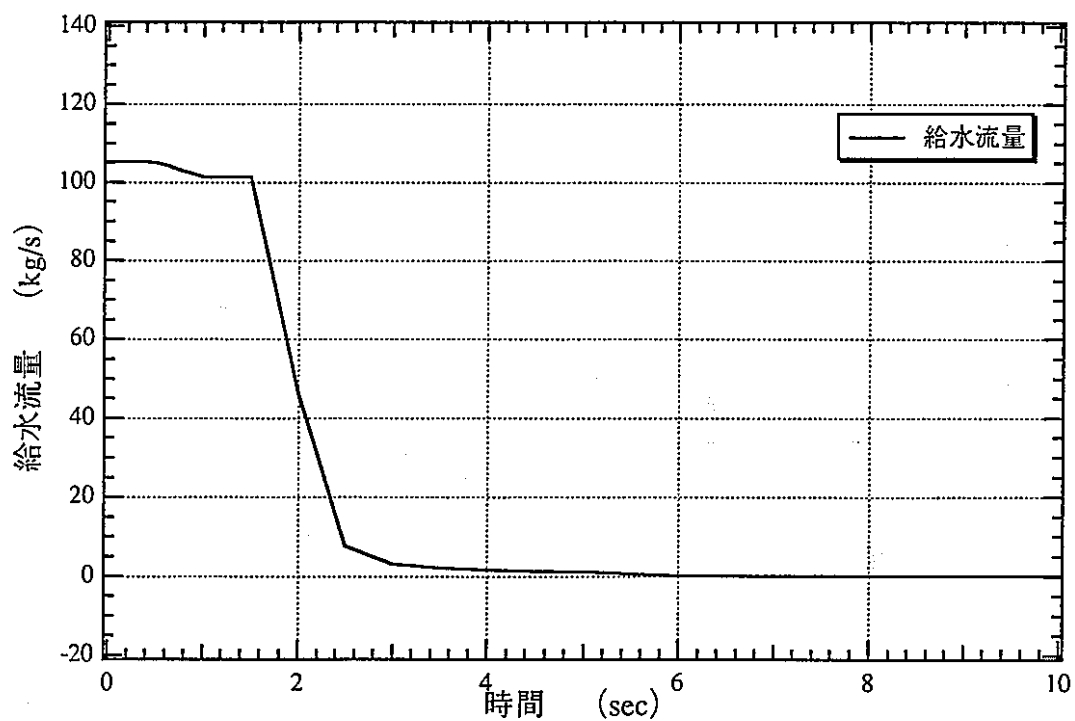
N = ノード番号  
注意点

表 4.3-4 SG 出入口放出弁流出係数

|           | BLOOPH              | RELAP5 / Mod.2 |             |
|-----------|---------------------|----------------|-------------|
|           | サブクール～過<br>熱蒸気域流出係数 | サブクール域<br>流出係数 | 二相域<br>流出係数 |
| EV 入口放出弁  | 0.6                 | 0.75           | 1.0         |
| EV 出口放出弁  | 0.6                 | 0.55           | 0.55        |
| EV 出口ドレン弁 | 0.6                 | 0.55           | 0.55        |
| SH 入口放出弁  | 0.6                 | 0.5            | 0.5         |
| SH 出口放出弁  | 0.6                 | 0.5            | 0.5         |
| SH 出口ドレン弁 | 0.6                 | 0.5            | 0.5         |



ケース 1 (BLOOPH)



ケース 1 (RELAP)

図4.3-1 SG 給水流量変化 (定格運転状態からのブロー)

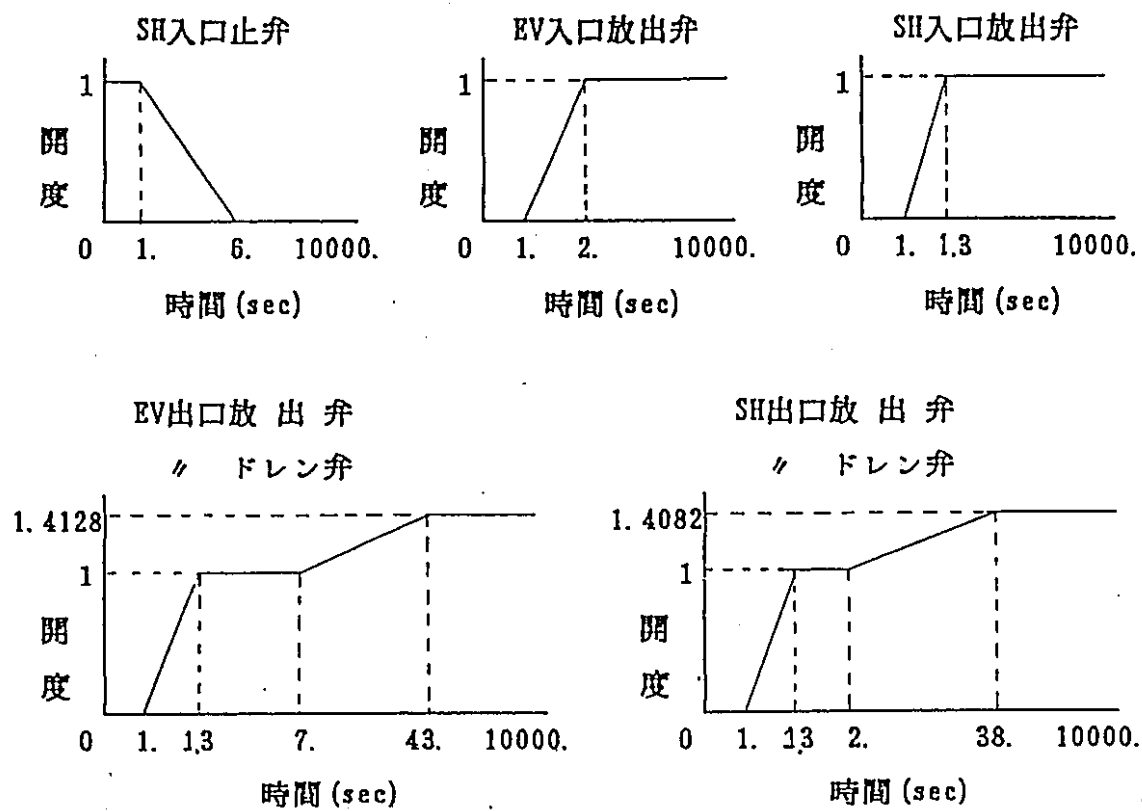
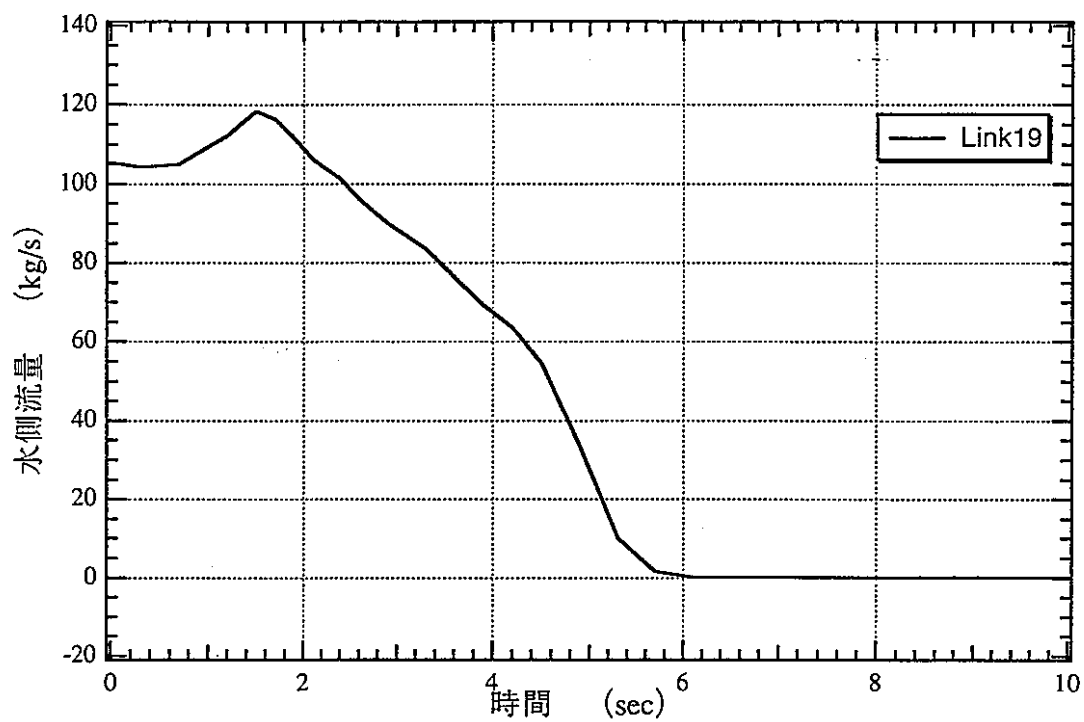
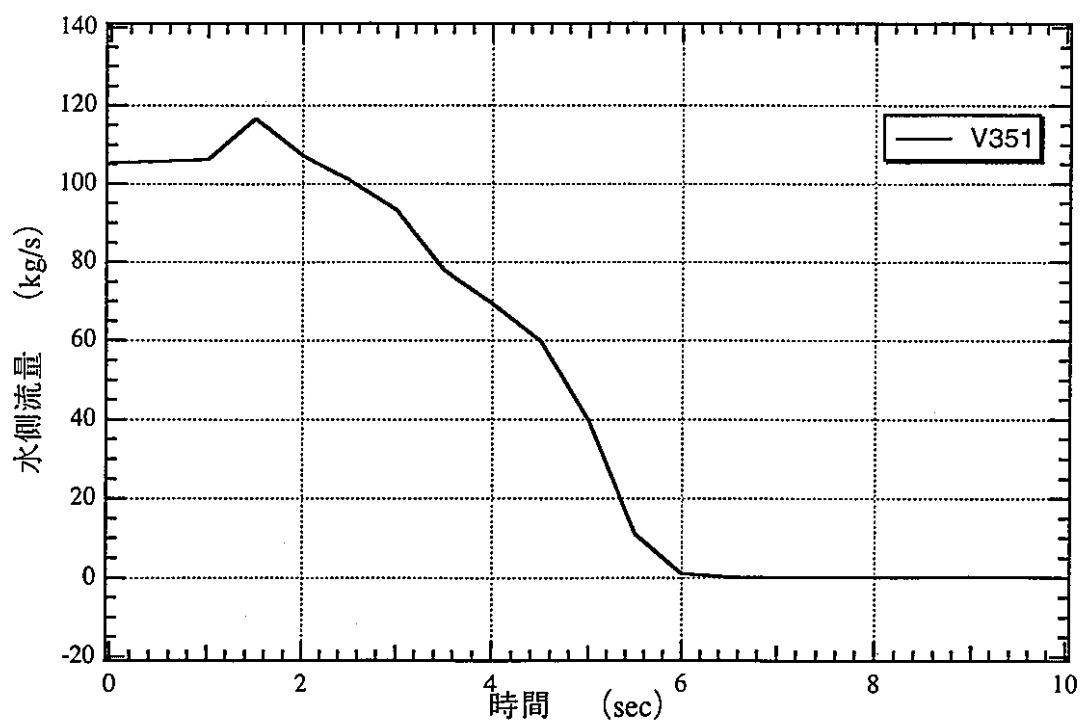


図4.3-2 SG 廻り制御弁の開度特性

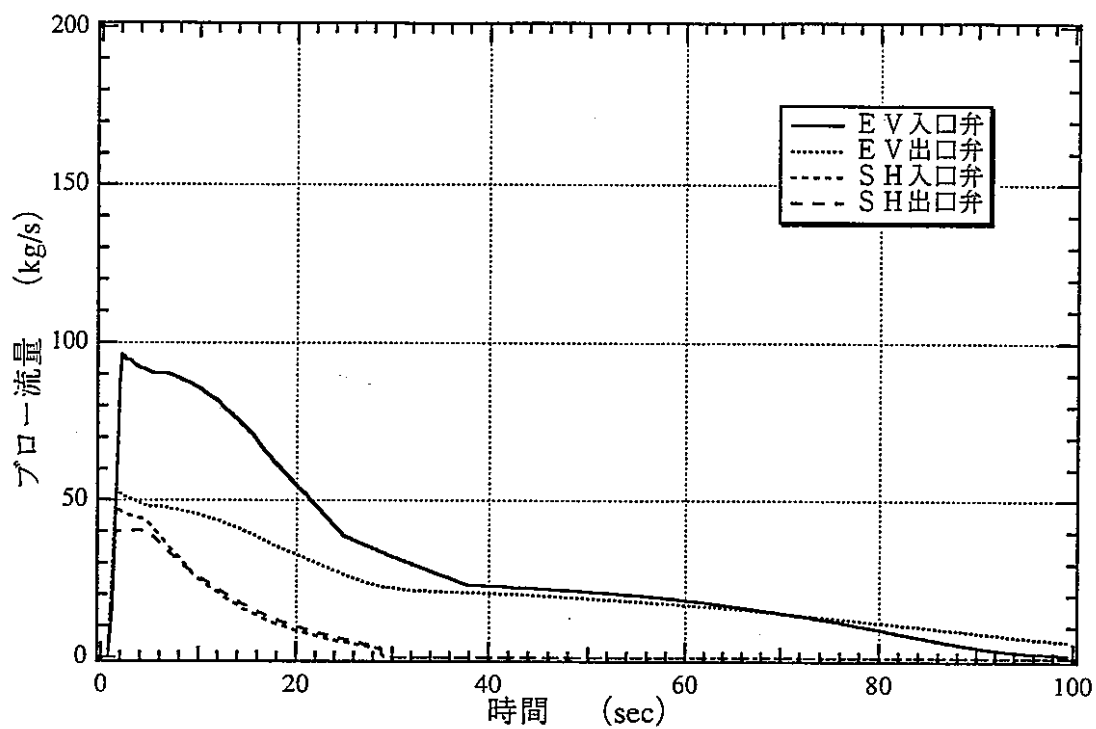


ケース 1 (BLOPH)

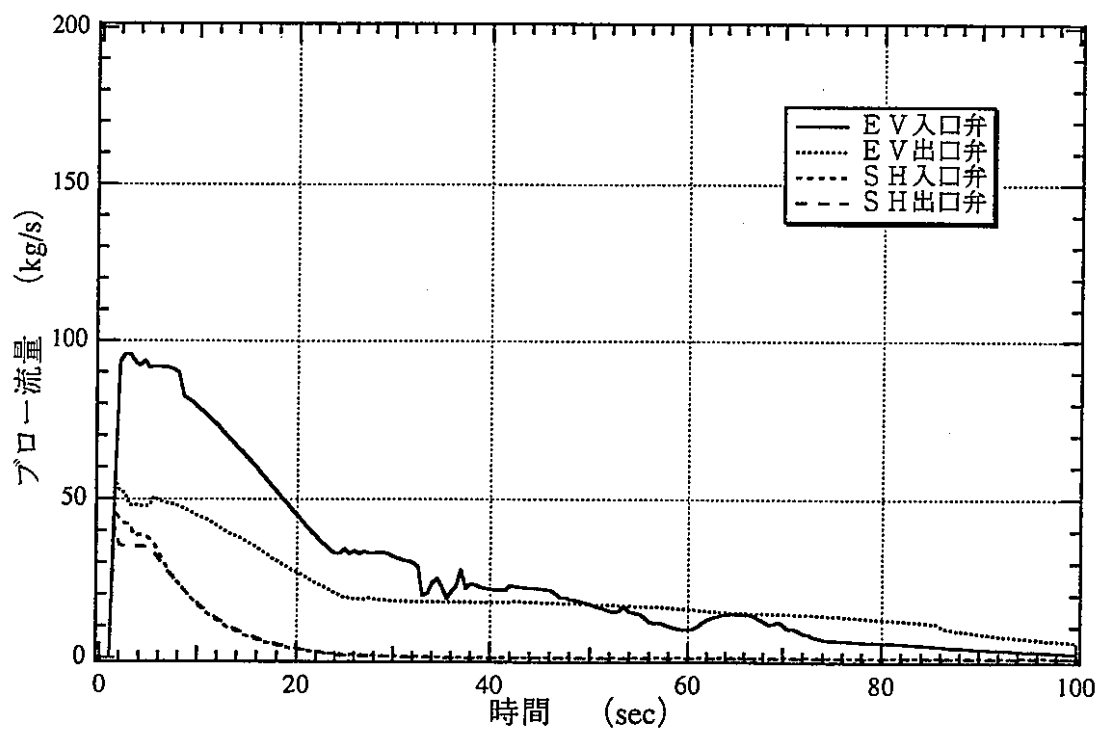


ケース 1 (RELAP)

図4.3-3 SH 入口止弁流量変化 (定格運転状態からのブロー)

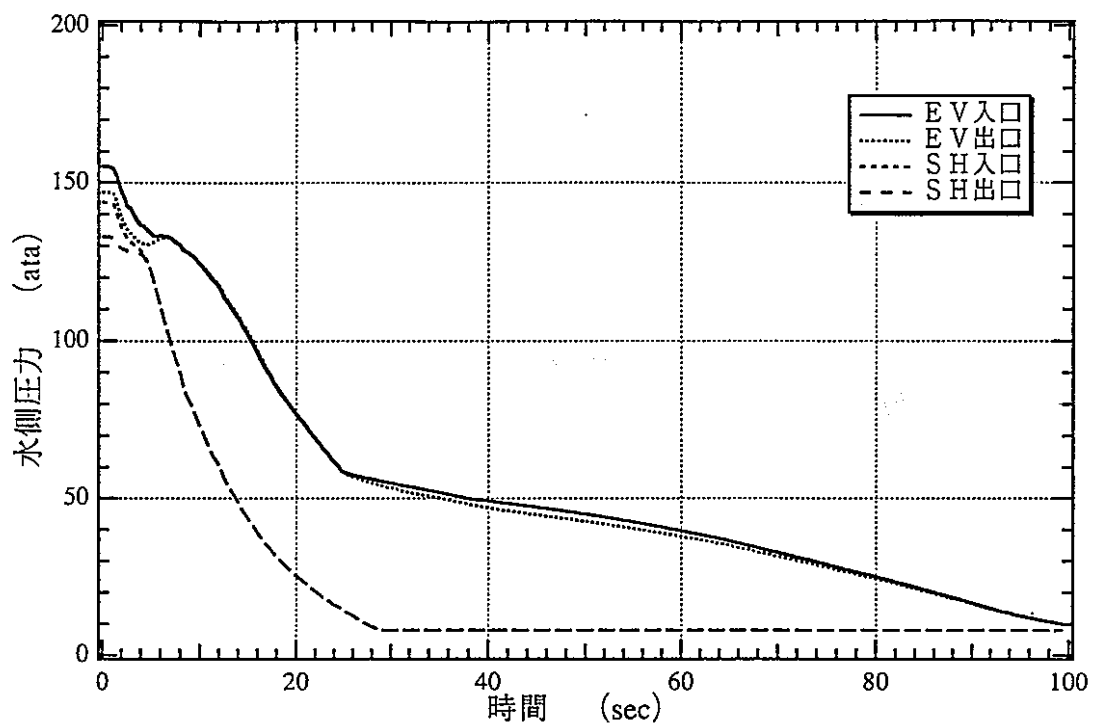


ケース 1 (BLOOPH)

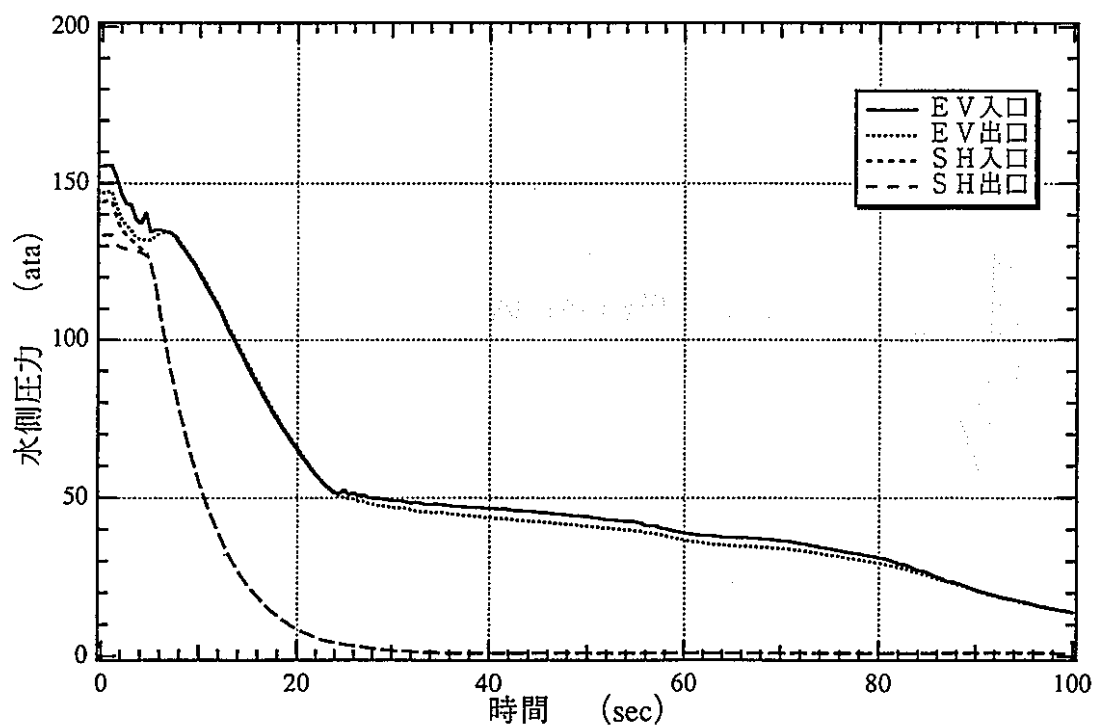


ケース 1 (RELAP)

図4.3-4 SG 出入口放出弁流量 (定格運転状態からのブロー)

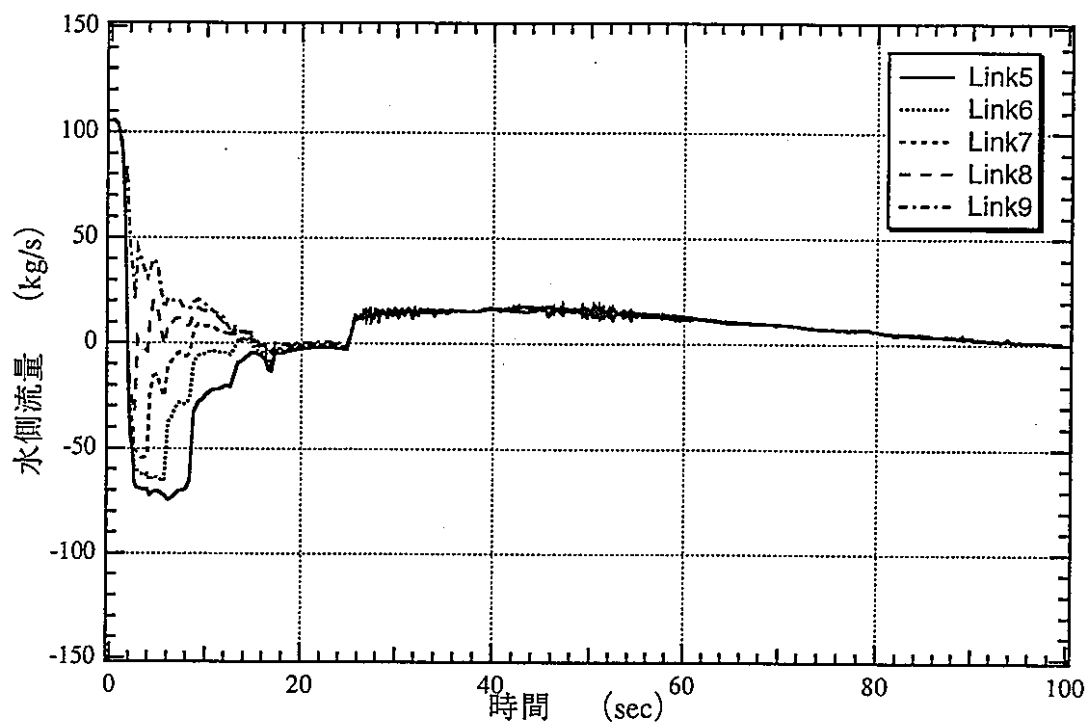


ケース 1 (BLOOPH)

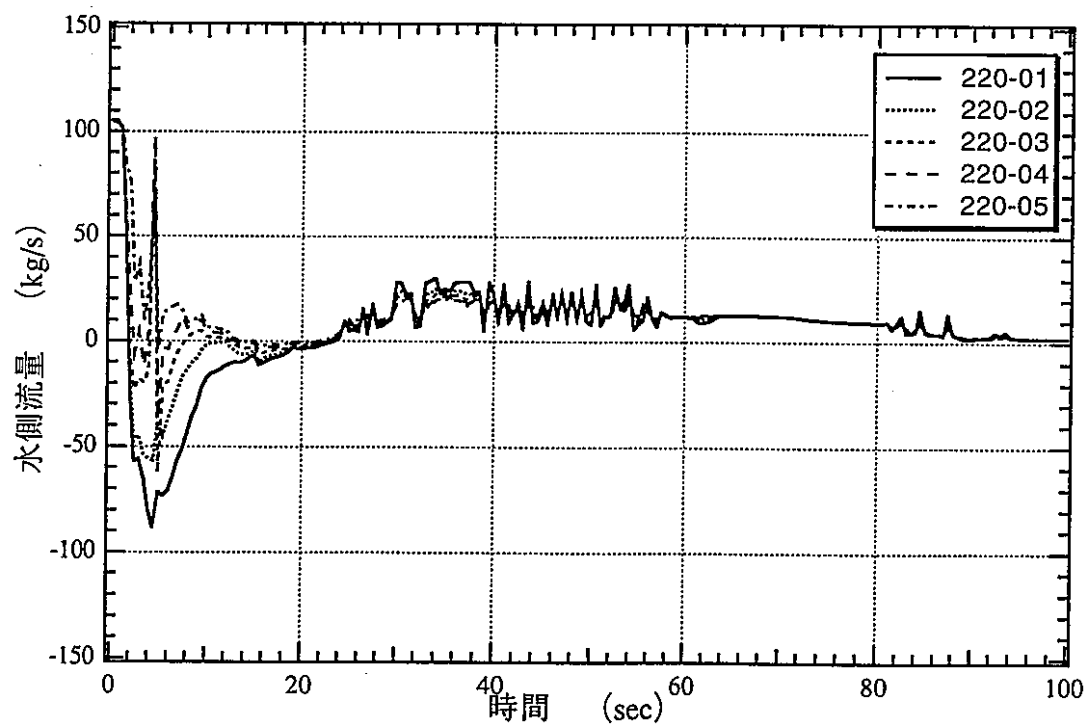


ケース 1 (RELAP)

図4.3-5 SG 出入口圧力変化 (定格運転状態からのブロー)



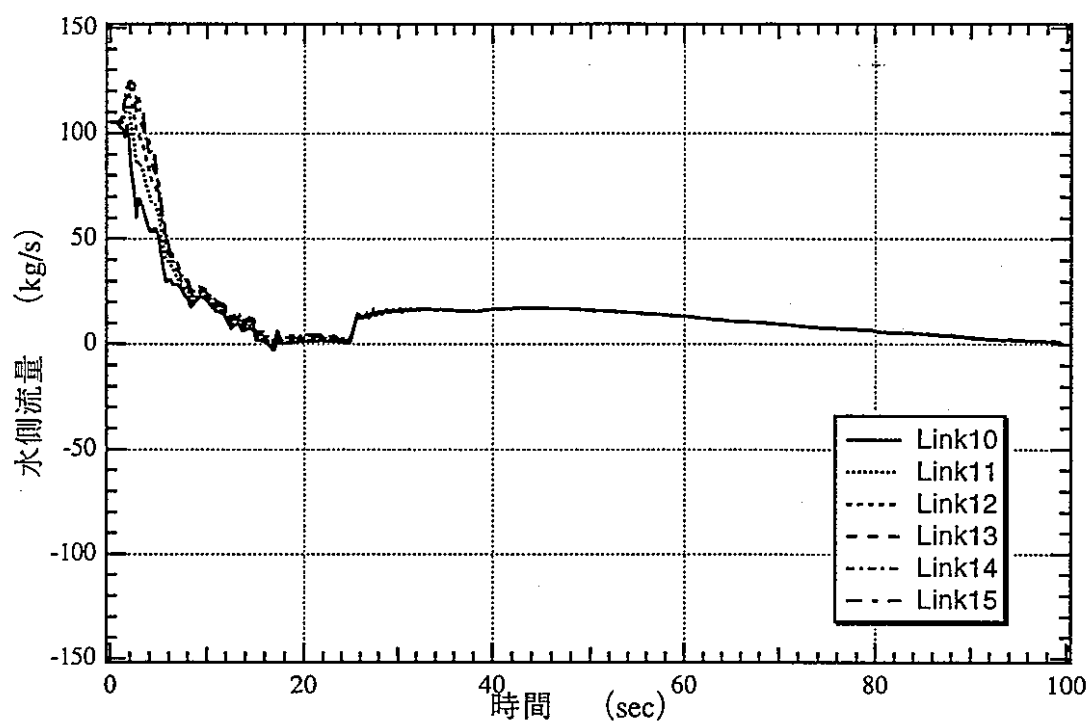
ケース 1 (BLOPH)



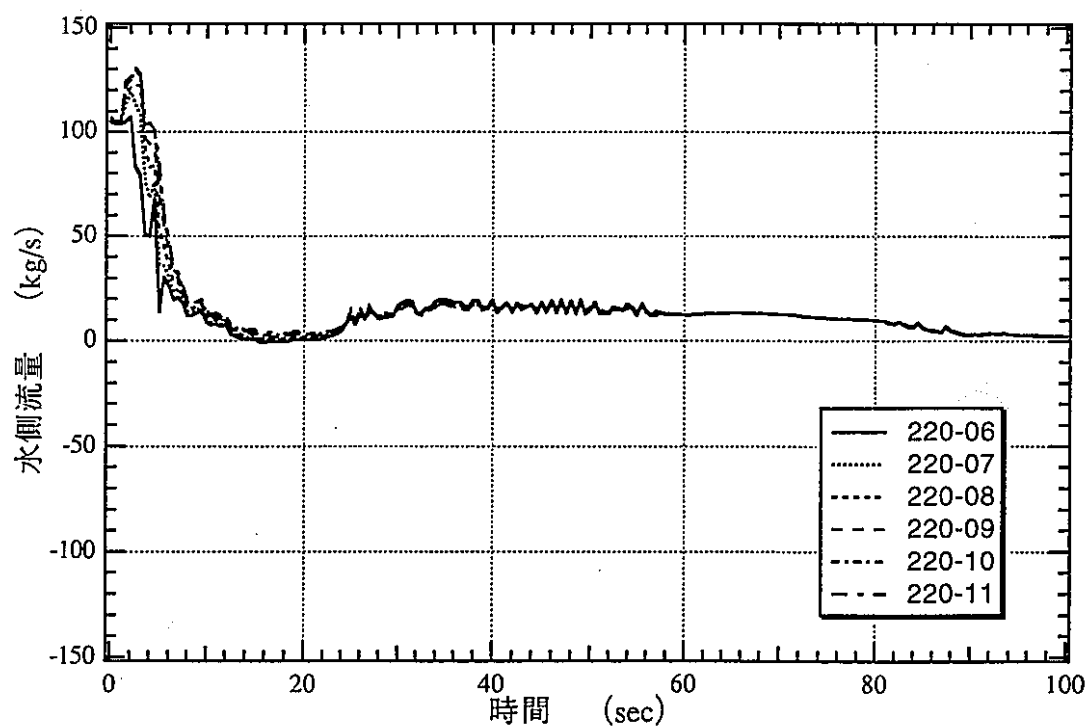
ケース 1 (RELAP)

図4.3-6 EV コイル下部流量変化 (定格運転状態からのブロー)



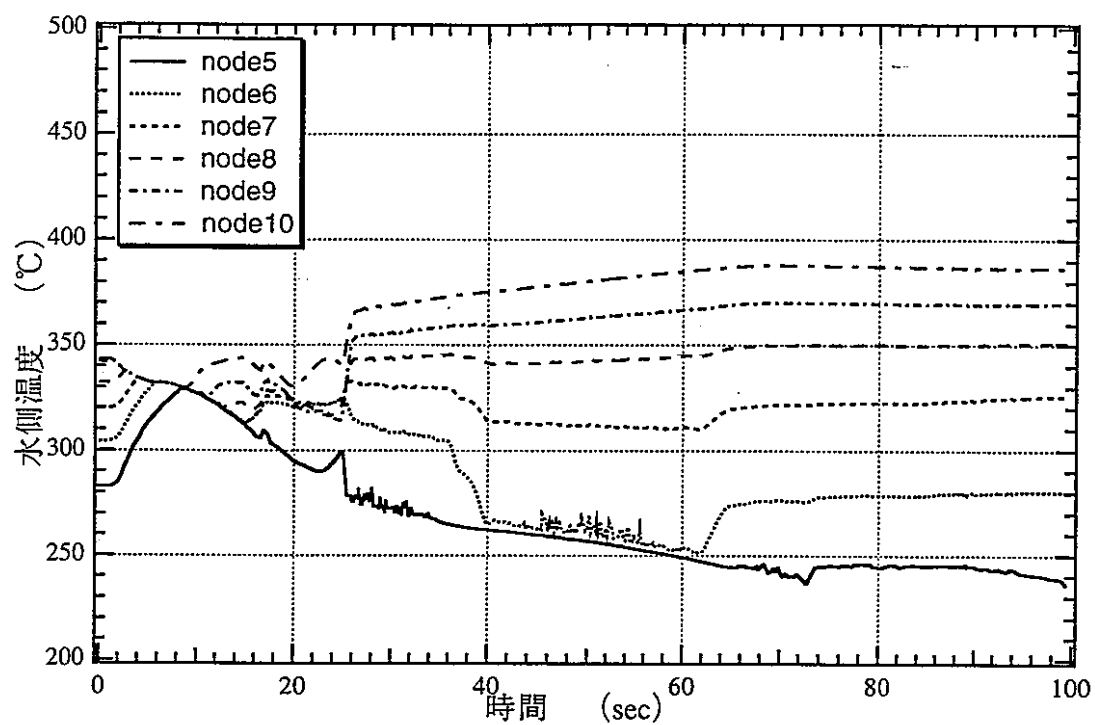


ケース 1 (BLOPH)

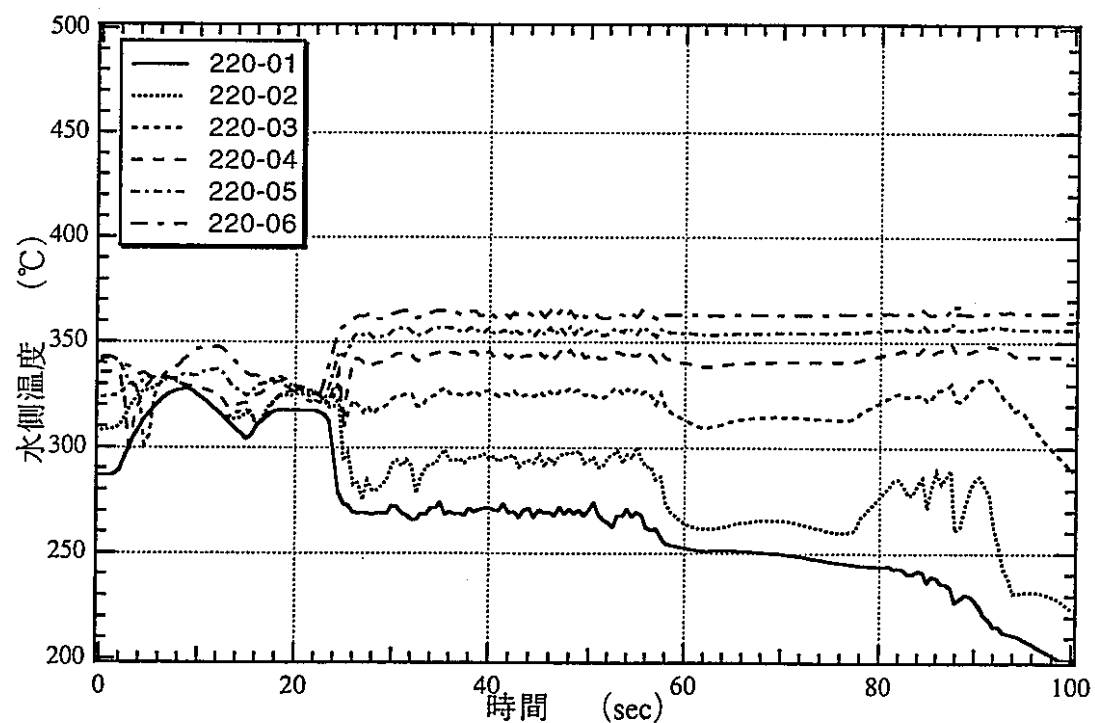


ケース 1 (RELAP)

図4.3-7 EV コイル上部流量変化 (定格運転状態からのブロー)

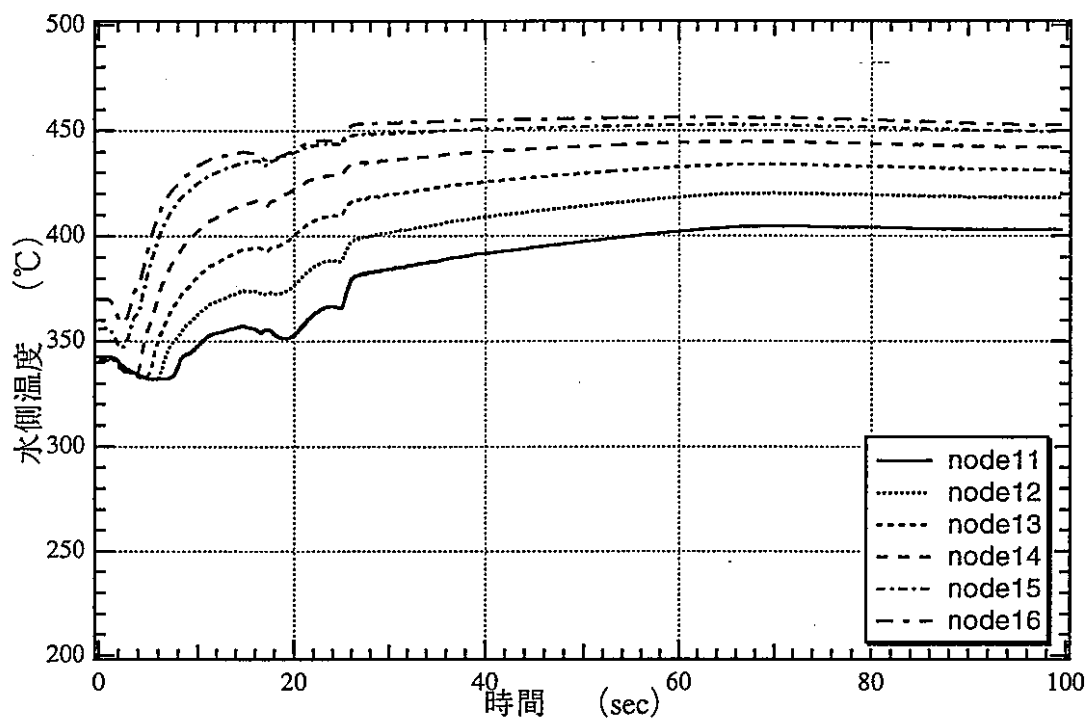


ケース 1 (BLOOPH)

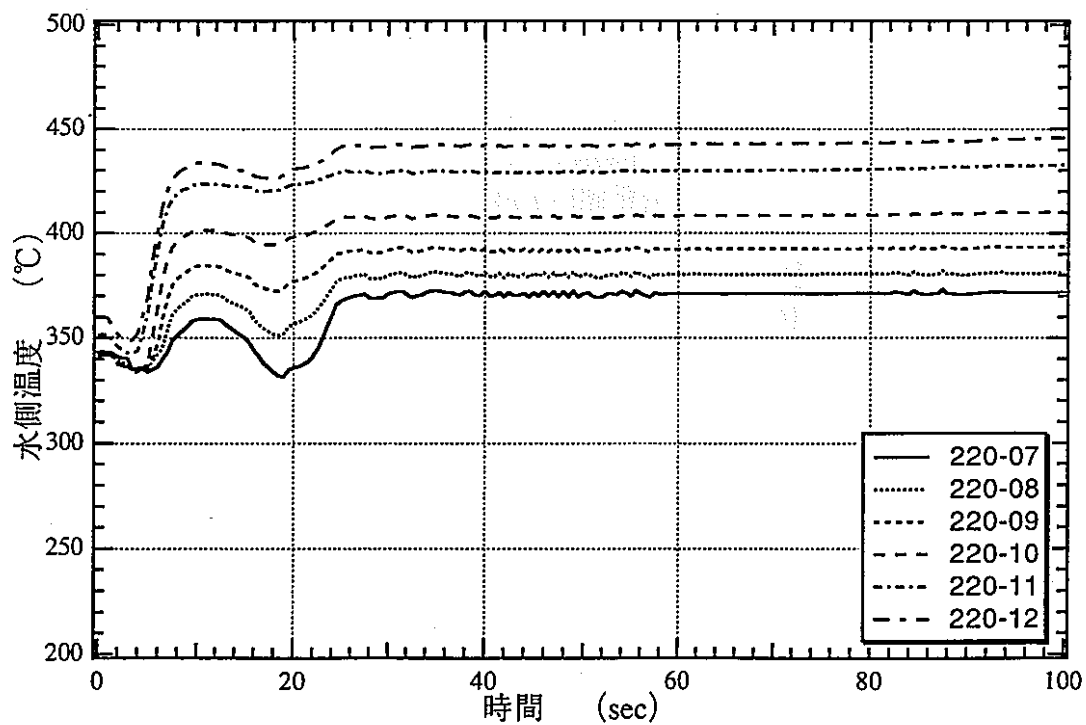


ケース 1 (RELAP)

図4.3-8 EV コイル下部温度変化 (定格運転状態からのブロー)

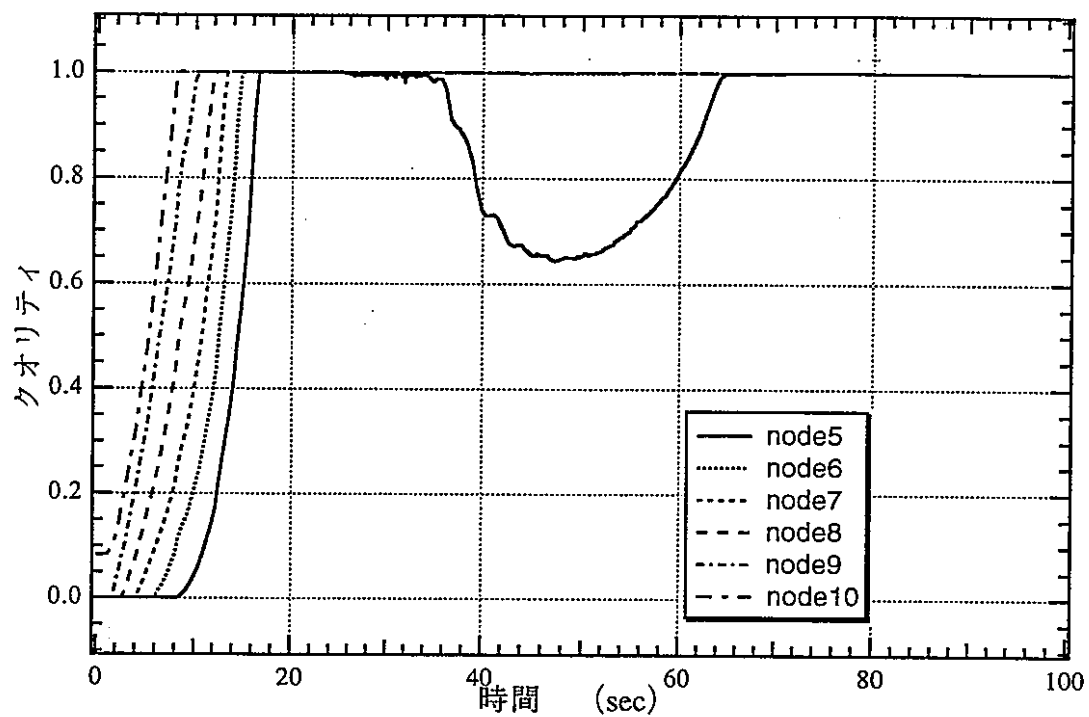


ケース 1 (BLOOPH)

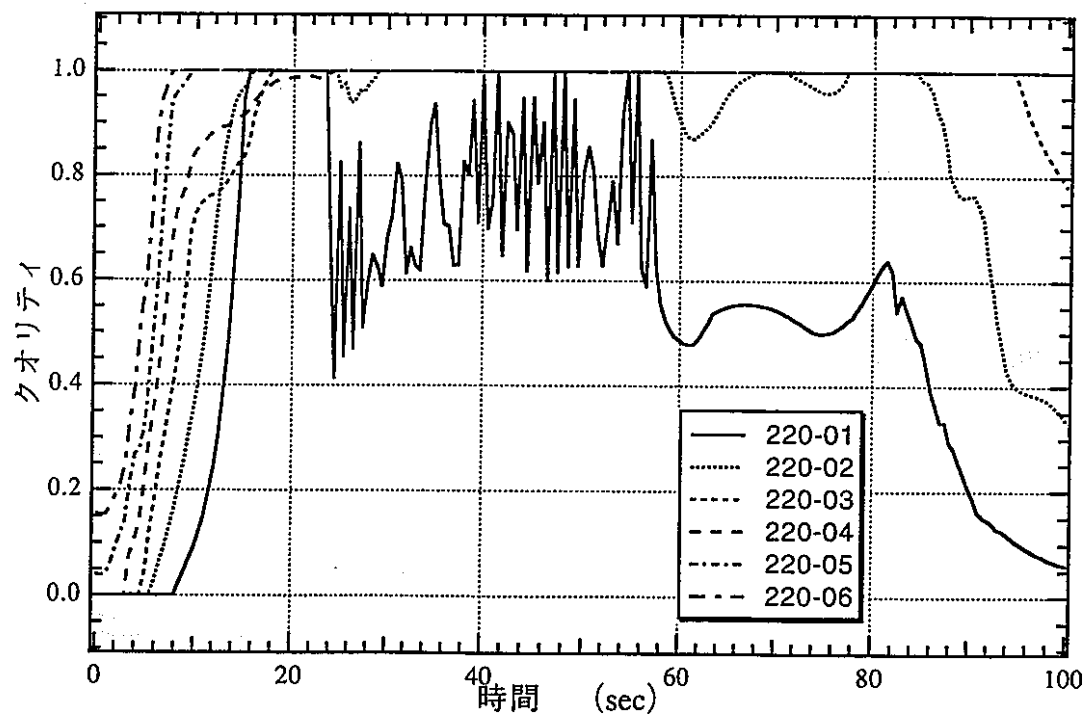


ケース 1 (RELAP)

図4.3-9 EV コイル上部温度変化 (定格運転状態からのブロー)

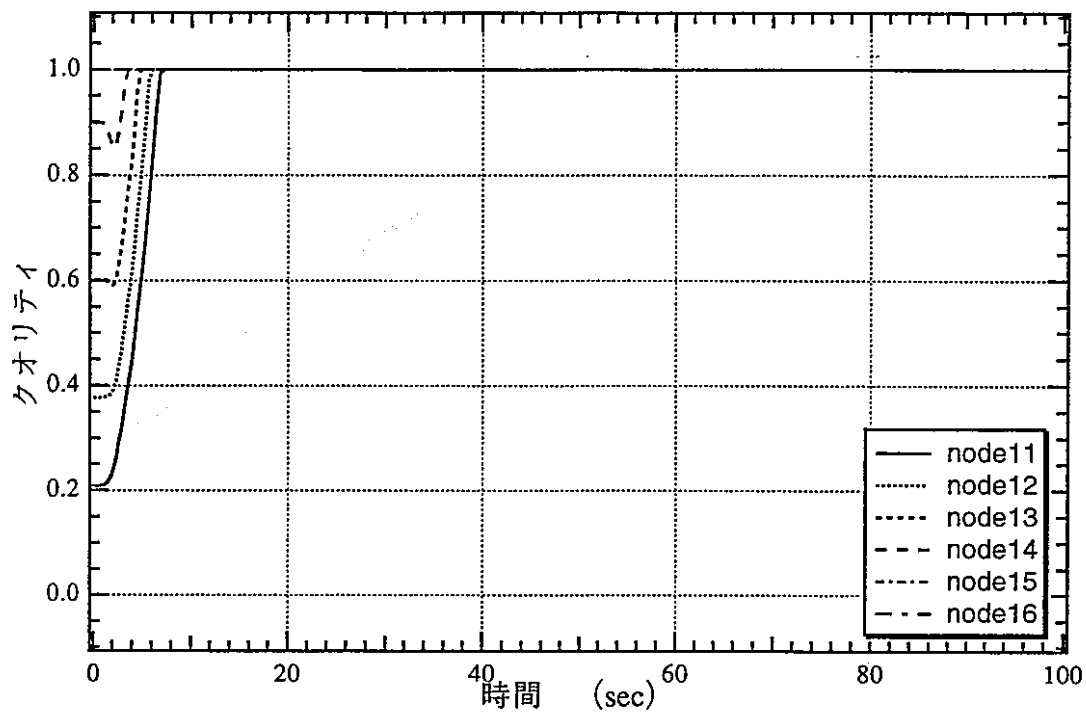


ケース 1 (BLOPH)

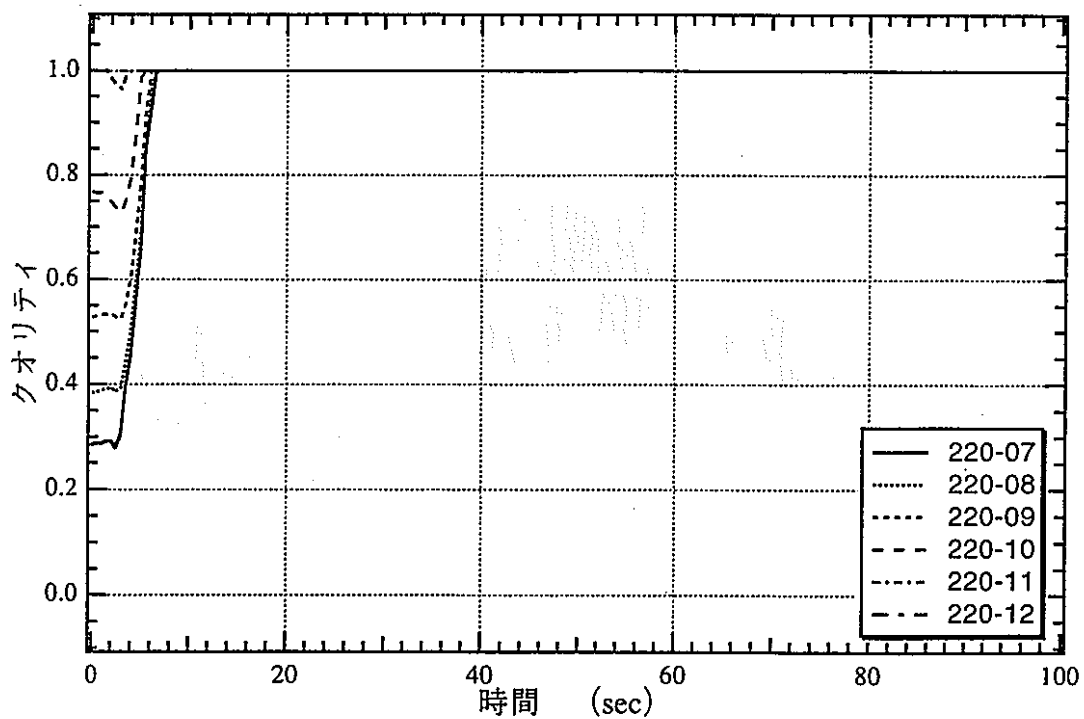


ケース 1 (RELAP)

図4.3-10 EV コイル下部クオリティ変化 (定格運転状態からのブロー)

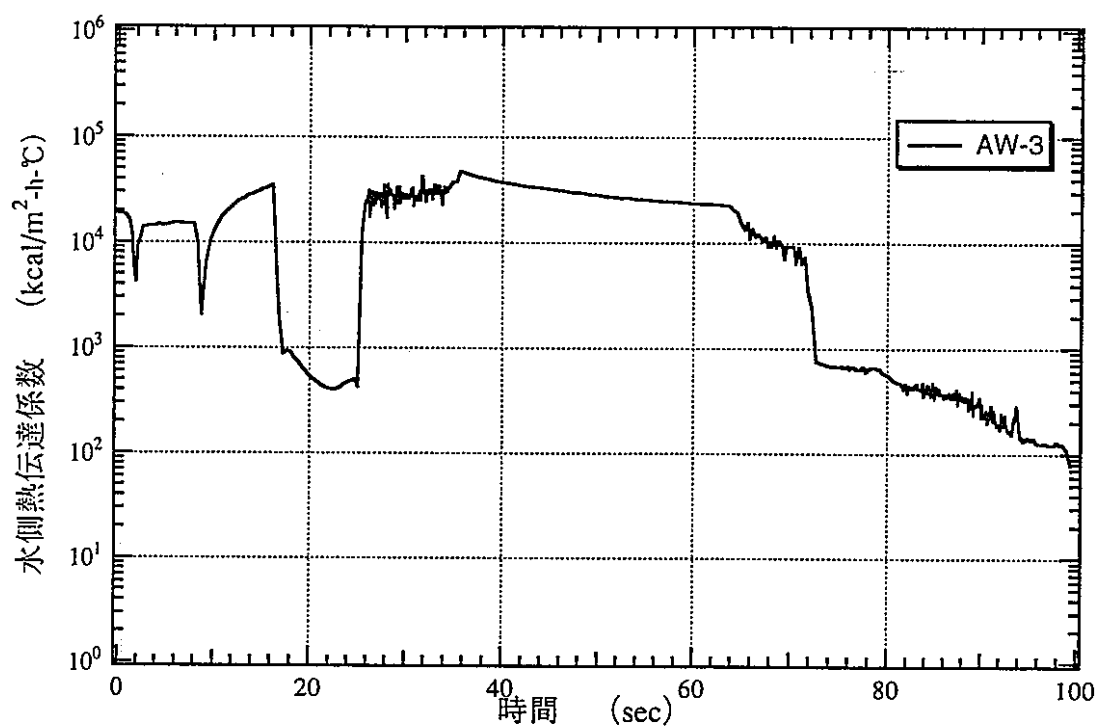


ケース 1 (BLOOPH)

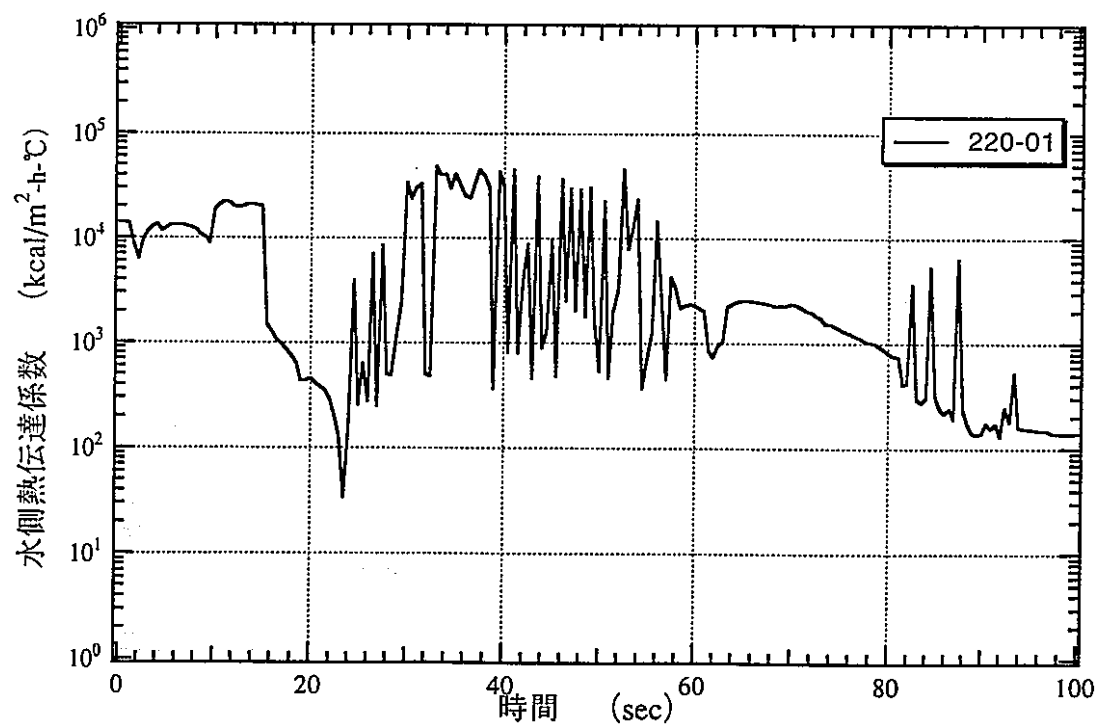


ケース 1 (RELAP)

図4.3-11 EV コイル上部クオリティ変化 (定格運転状態からのブロー)

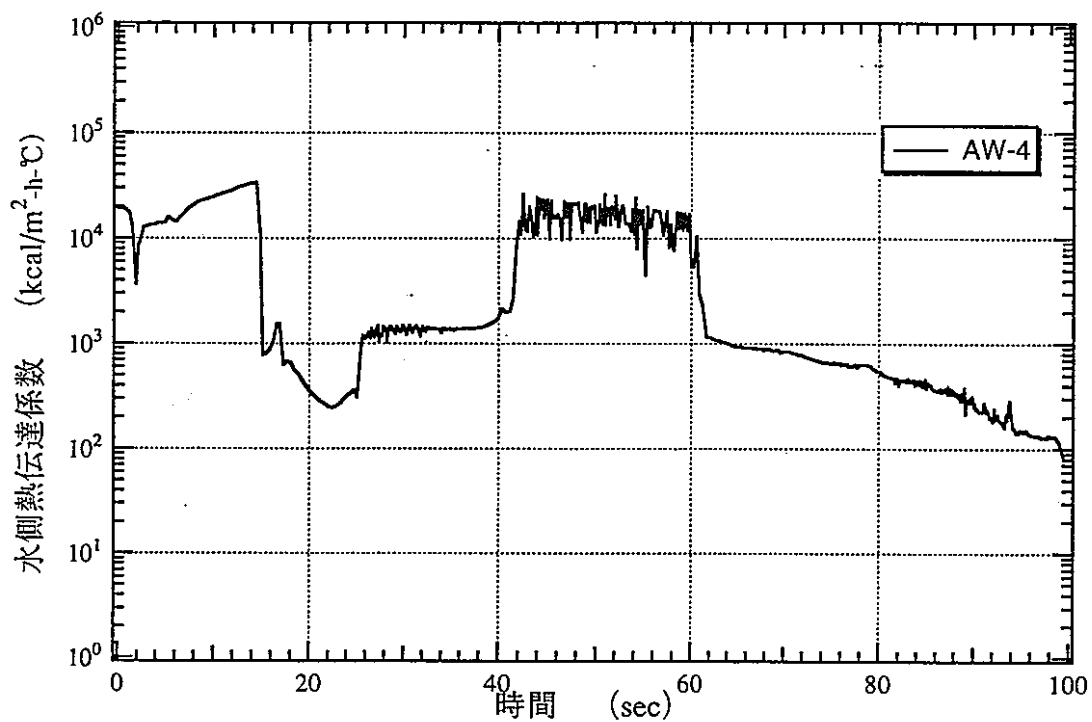


ケース 1 (BLOPH)

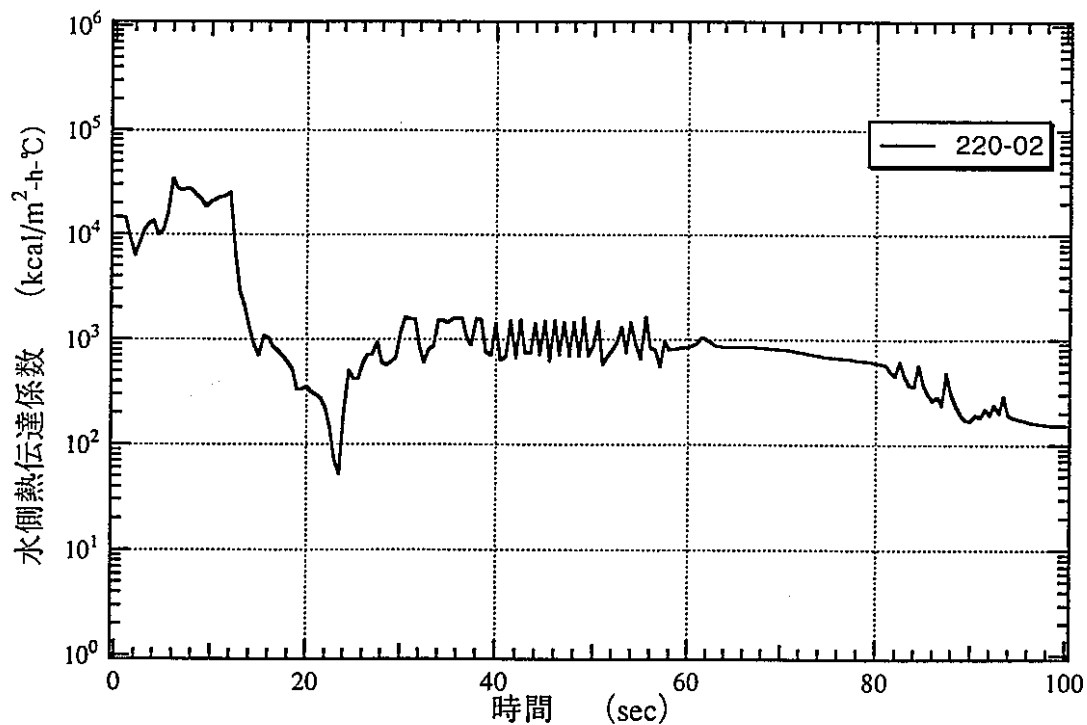


ケース 1 (RELAP)

図4.3-12 EV コイル熱伝達係数変化 (1/12) (定格運転状態からのブロー)

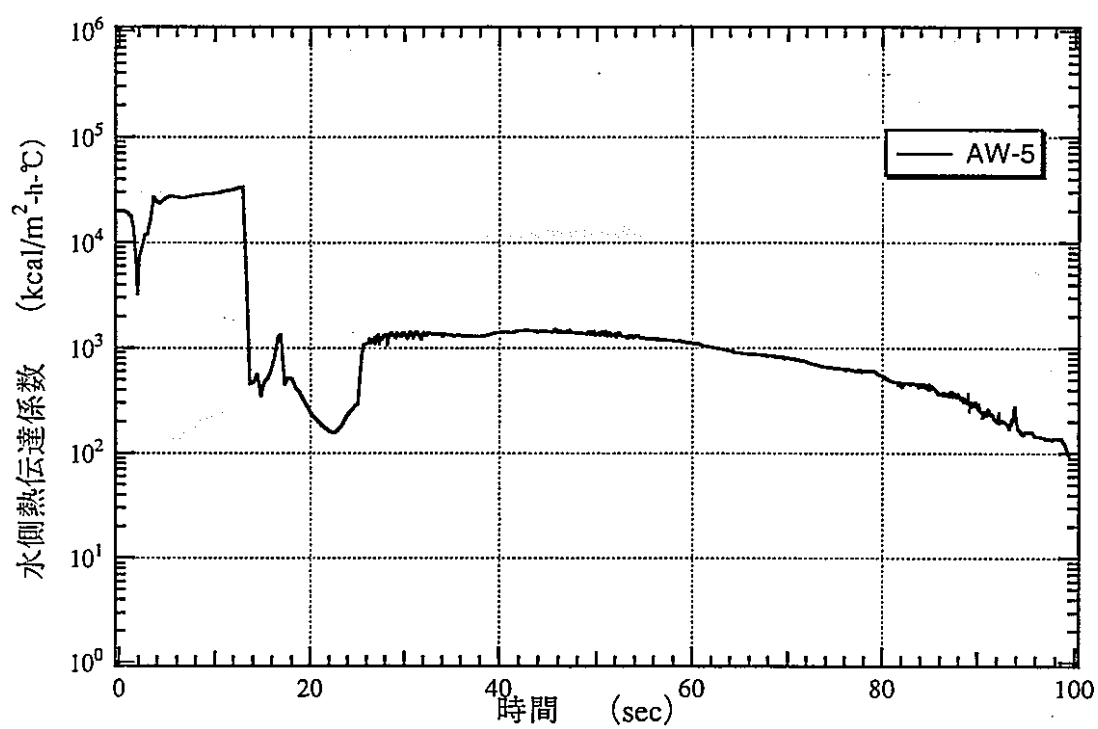


ケース 1 (BLOOPH)

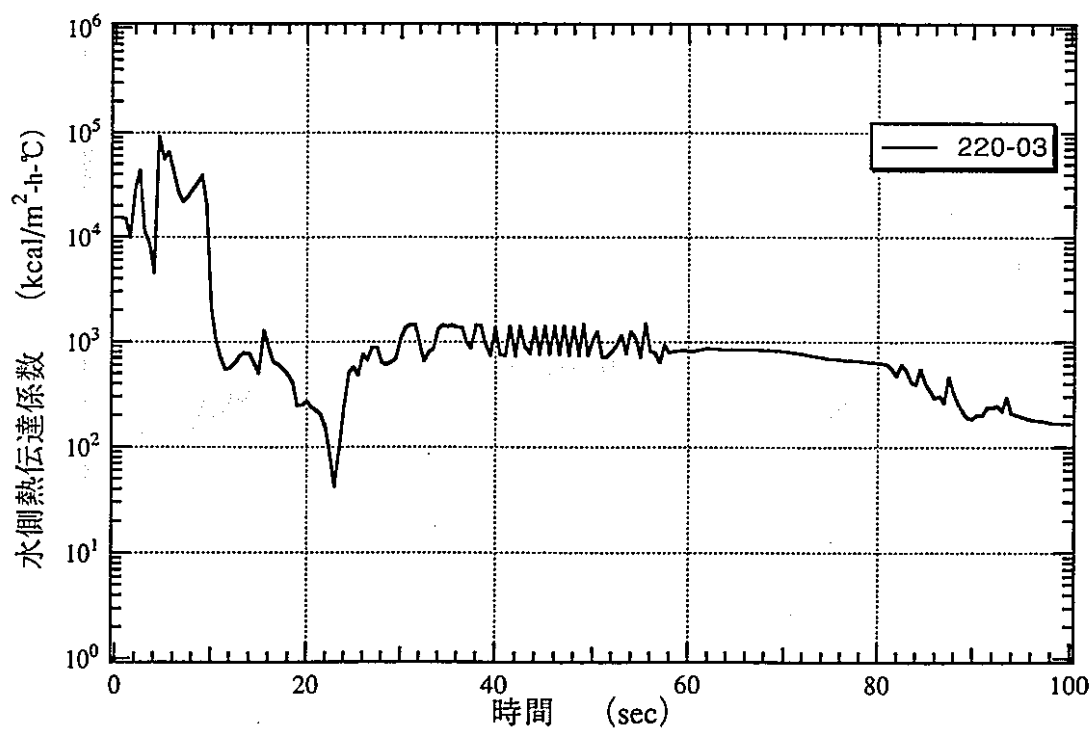


ケース 1 (RELAP)

図4.3-13 EV コイル熱伝達係数変化 (2/12) (定格運転状態からのブロー)



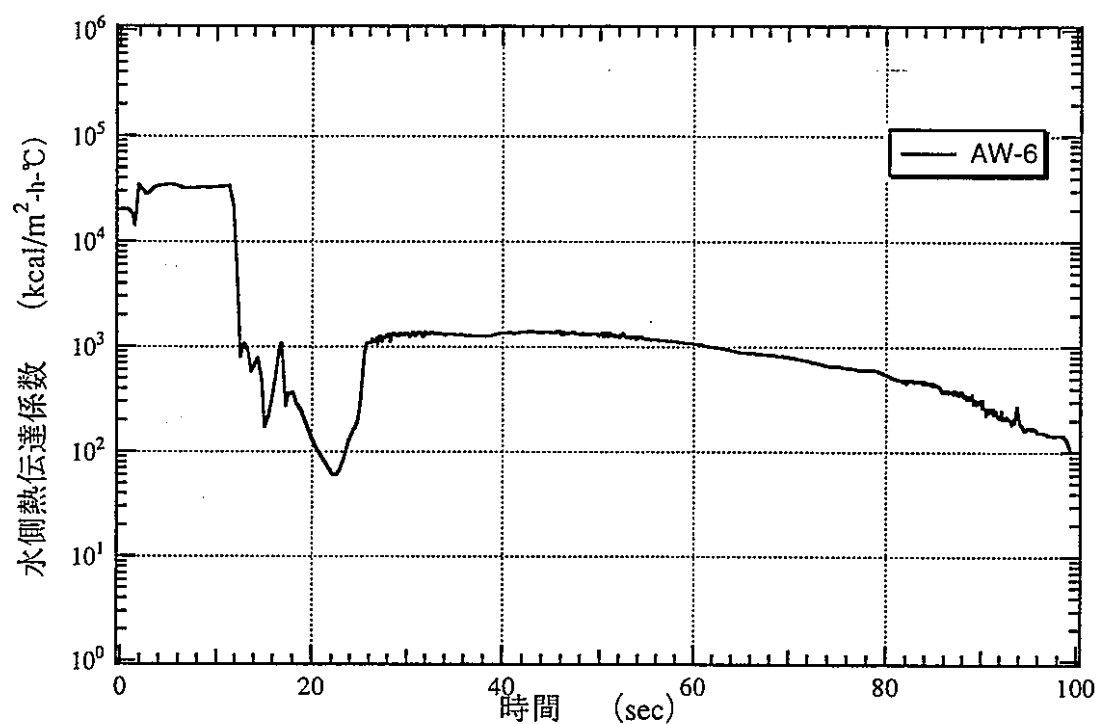
ケース 1 (BLOOPH)



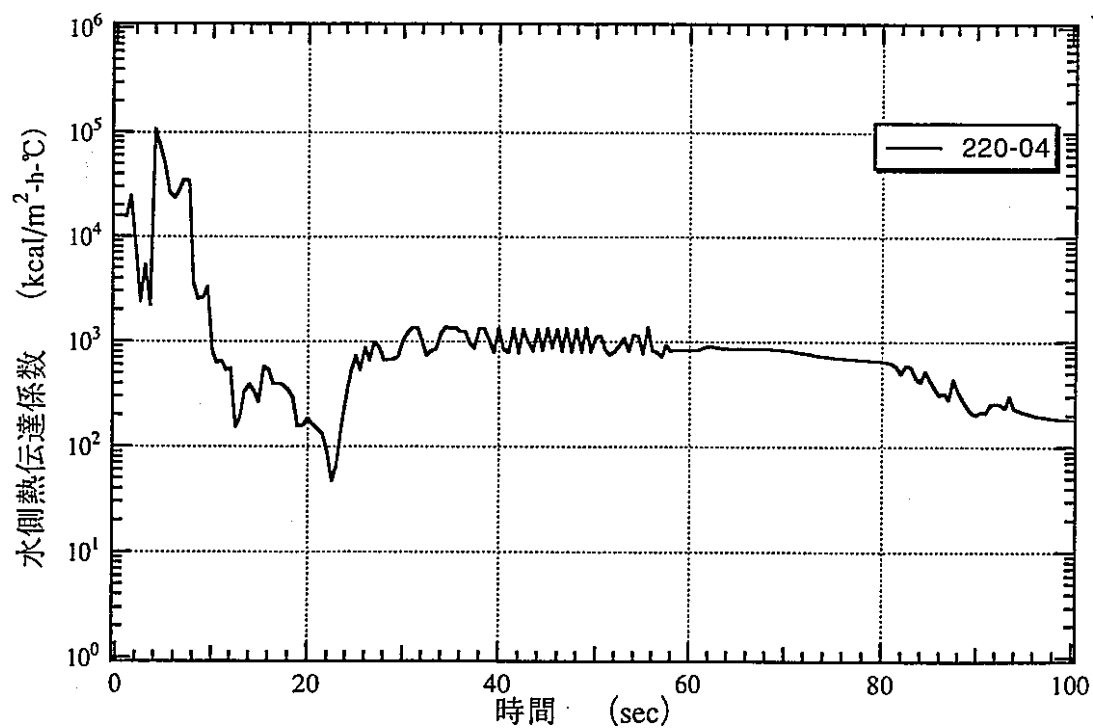
ケース 1 (RELAP)

図4.3-14 EV コイル熱伝達係数変化 (3/12) (定格運転状態からのブロー)



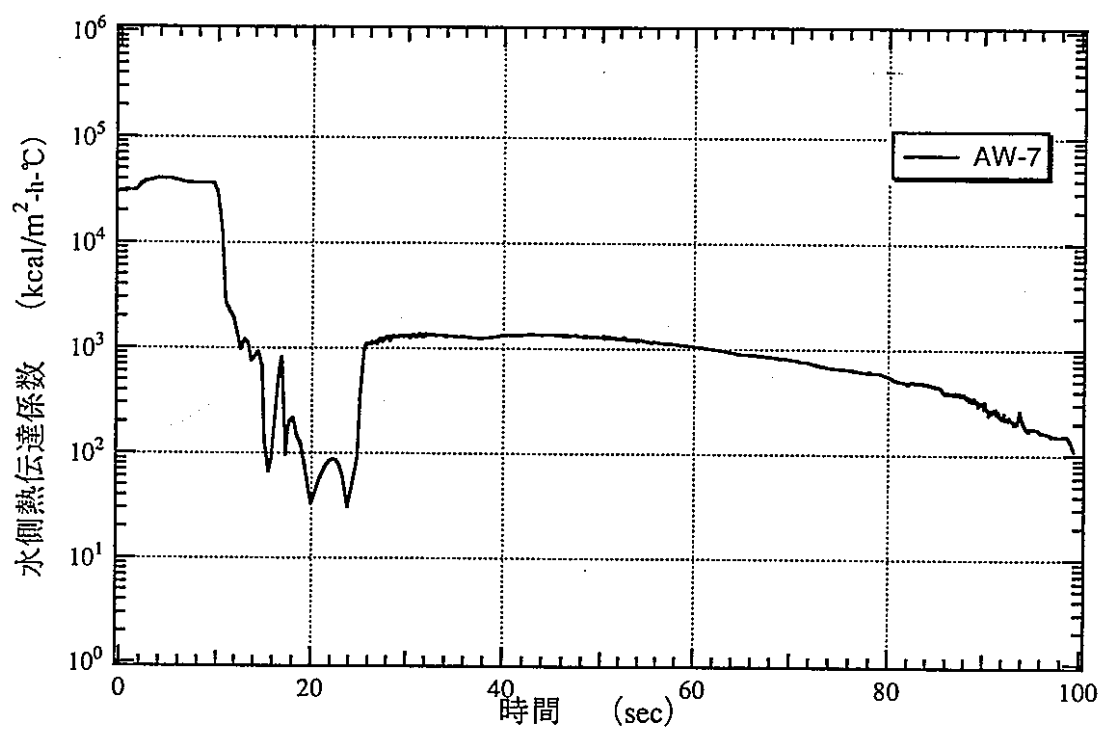


ケース 1 (BLOOPH)

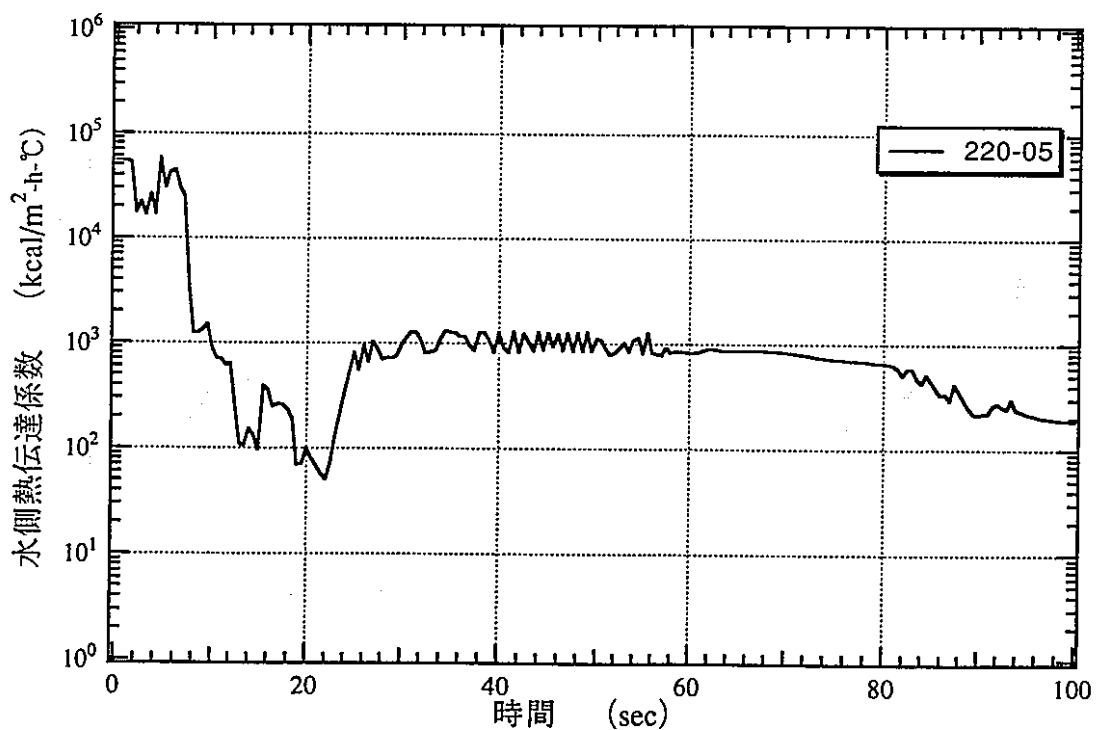


ケース 1 (RELAP)

図4.3-15 EV コイル熱伝達係数変化 (4/12) (定格運転状態からのブロー)

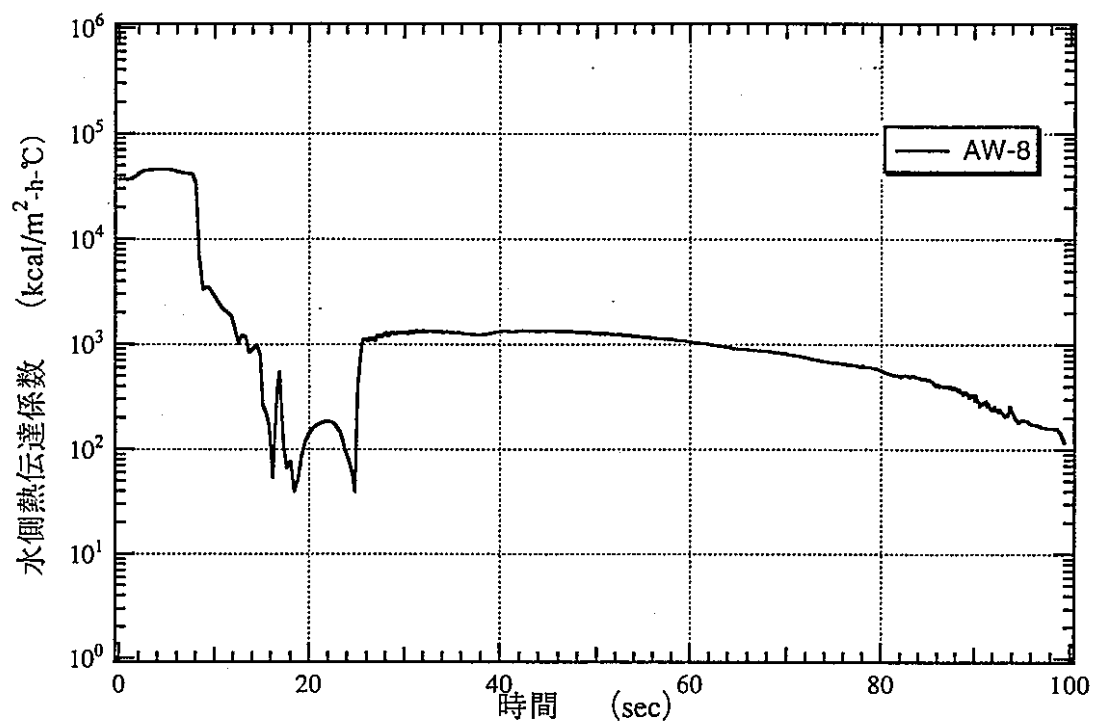


ケース 1 (BLOOPH)

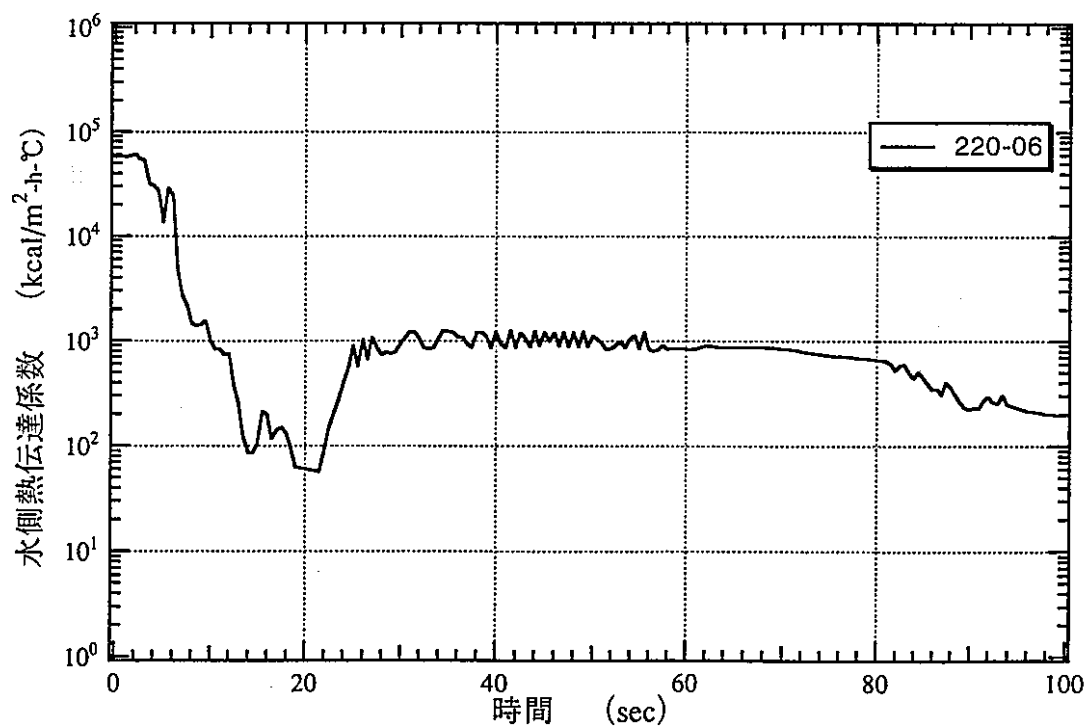


ケース 1 (RELAP)

図4.3-16 EV コイル熱伝達係数変化 (5/12) (定格運転状態からのブロー)

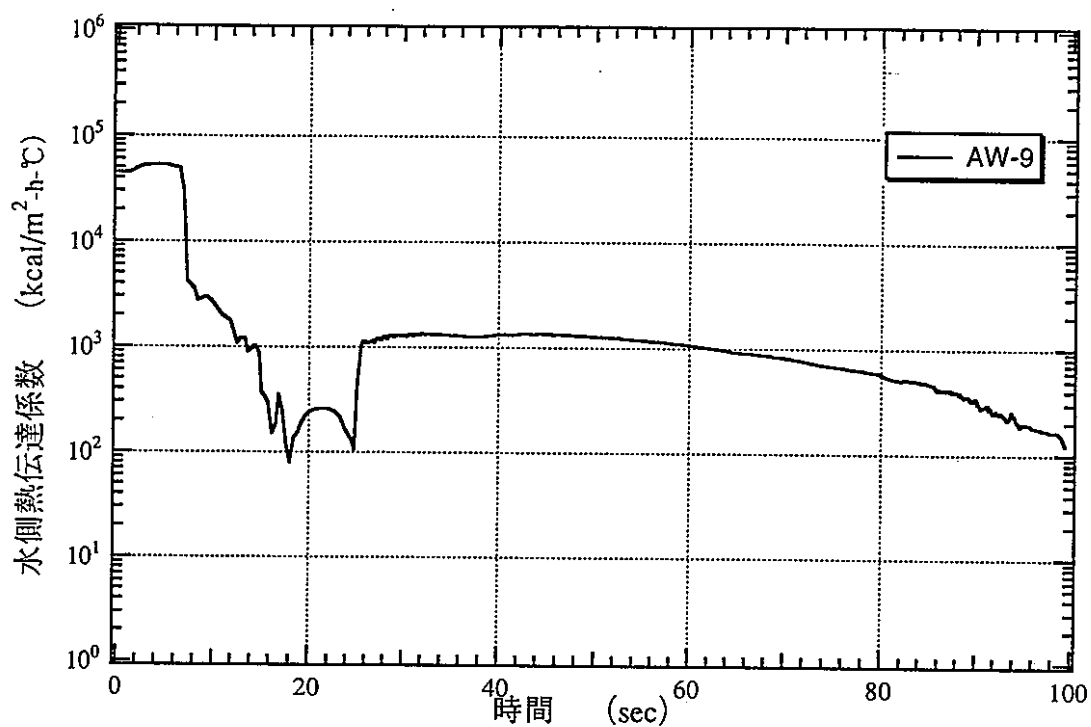


ケース 1 (BLOOPH)

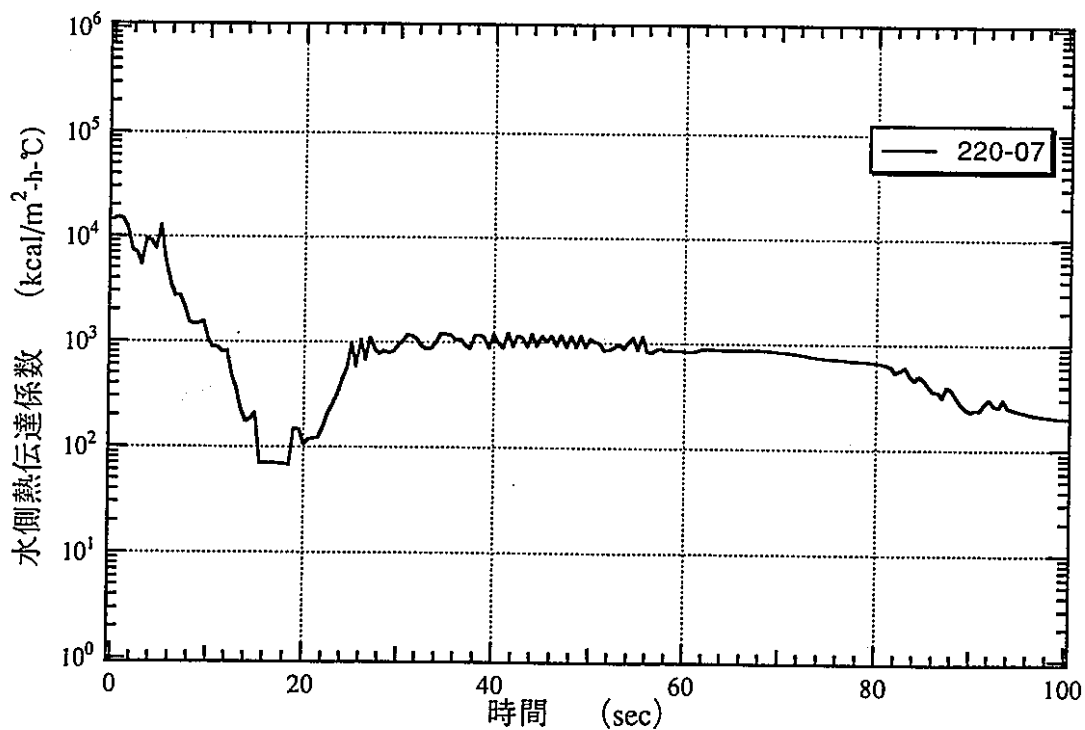


ケース 1 (RELAP)

図4.3-17 EV コイル熱伝達係数変化 (6/12) (定格運転状態からのブロー)

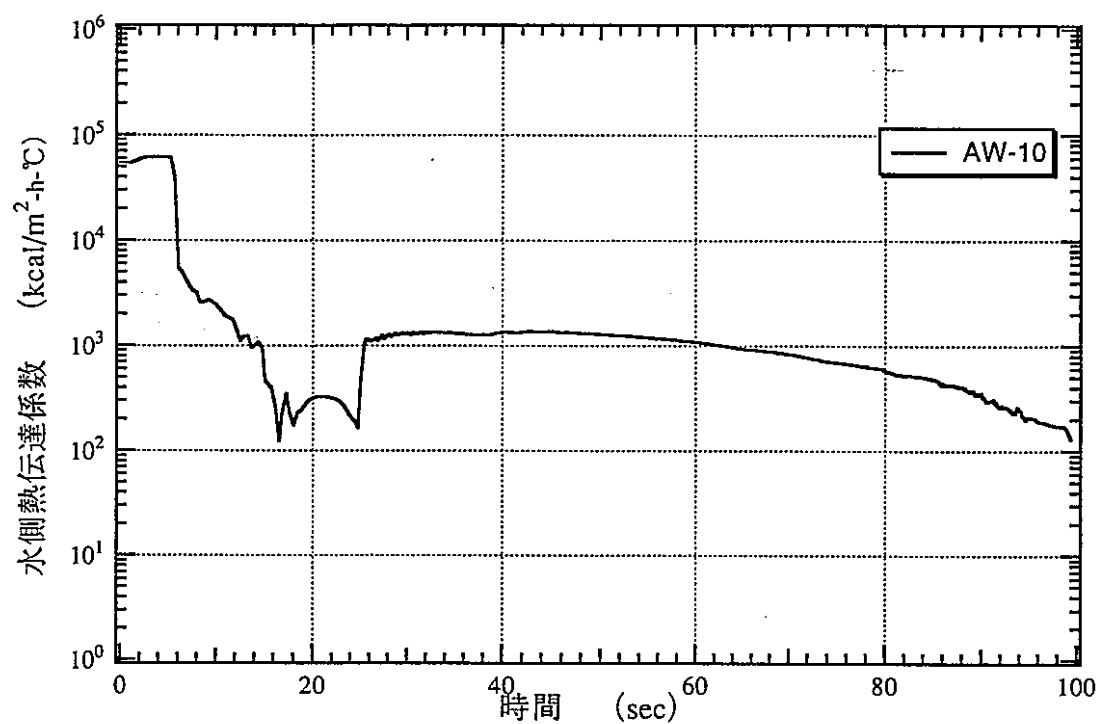


ケース 1 (BLOOPH)

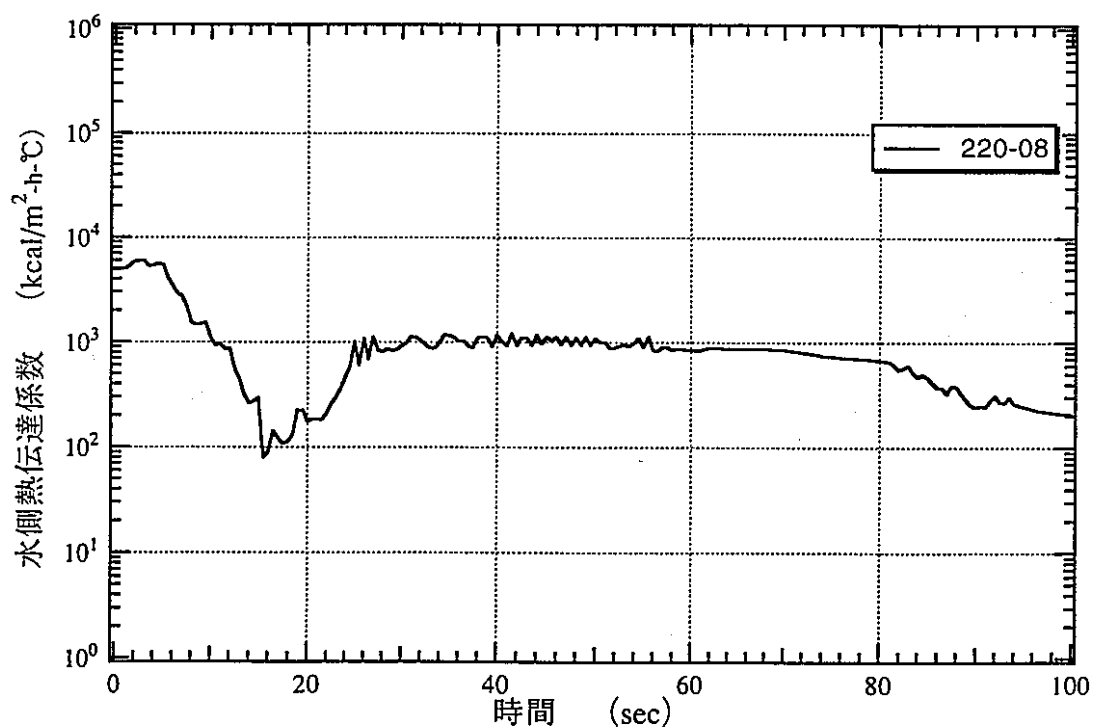


ケース 1 (RELAP)

図4.3-18 EV コイル熱伝達係数変化 (7/12) (定格運転状態からのブロー)

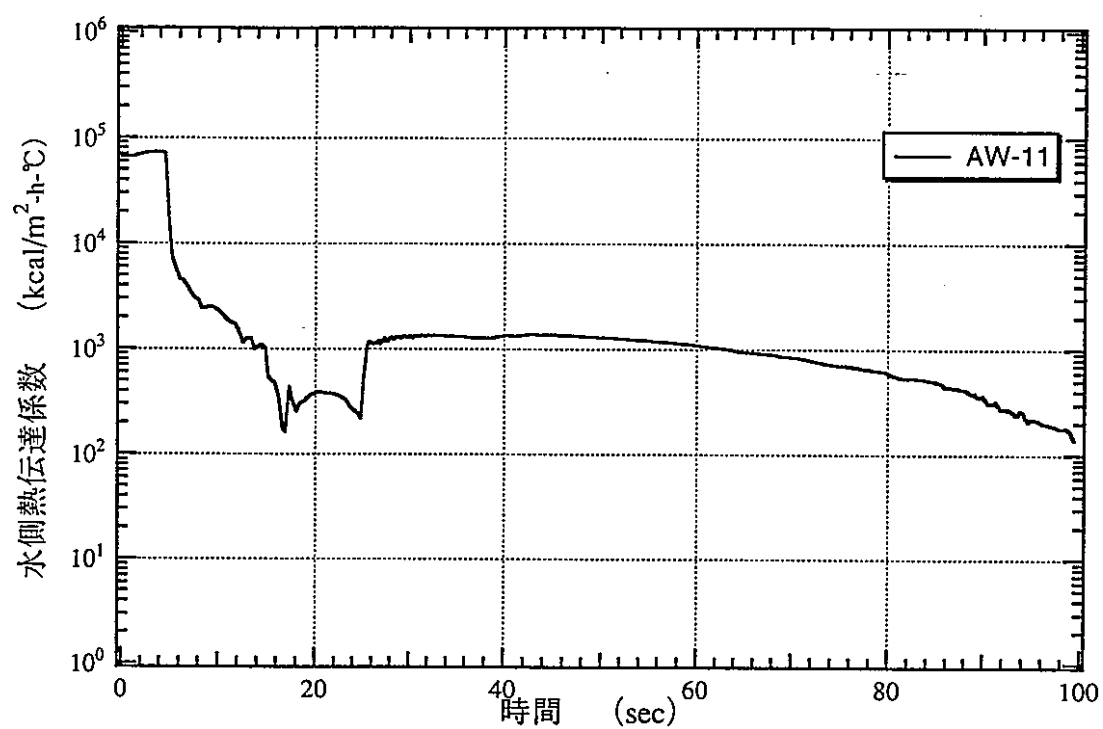


ケース 1 (BLOOPH)

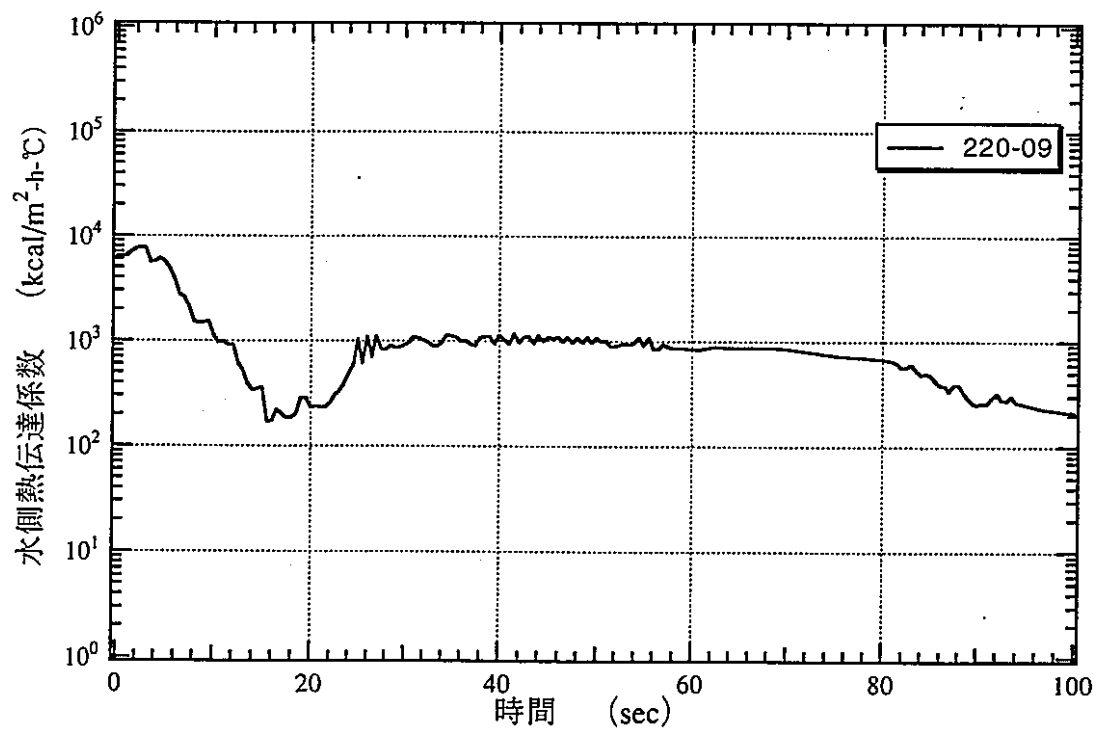


ケース 1 (RELAP)

図4.3-19 EV コイル熱伝達係数変化 (8/12) (定格運転状態からのブロー)

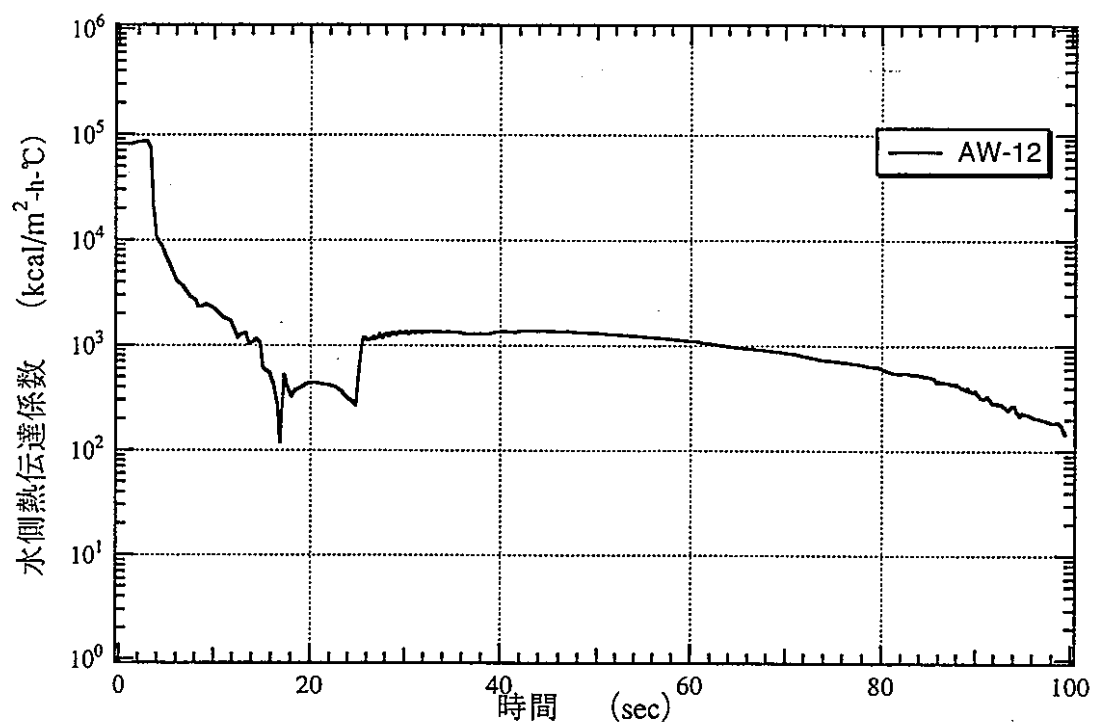


ケース 1 (BLOOPH)

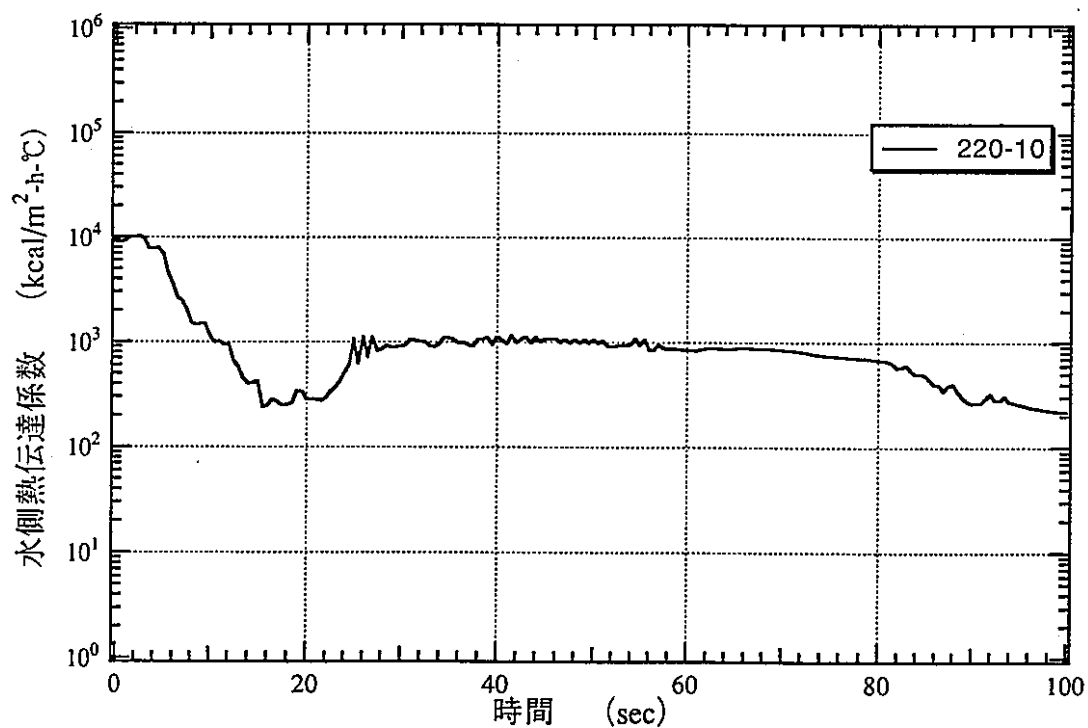


ケース 1 (RELAP)

図4.3-20 EV コイル熱伝達係数変化 (9/12) (定格運転状態からのブロー)

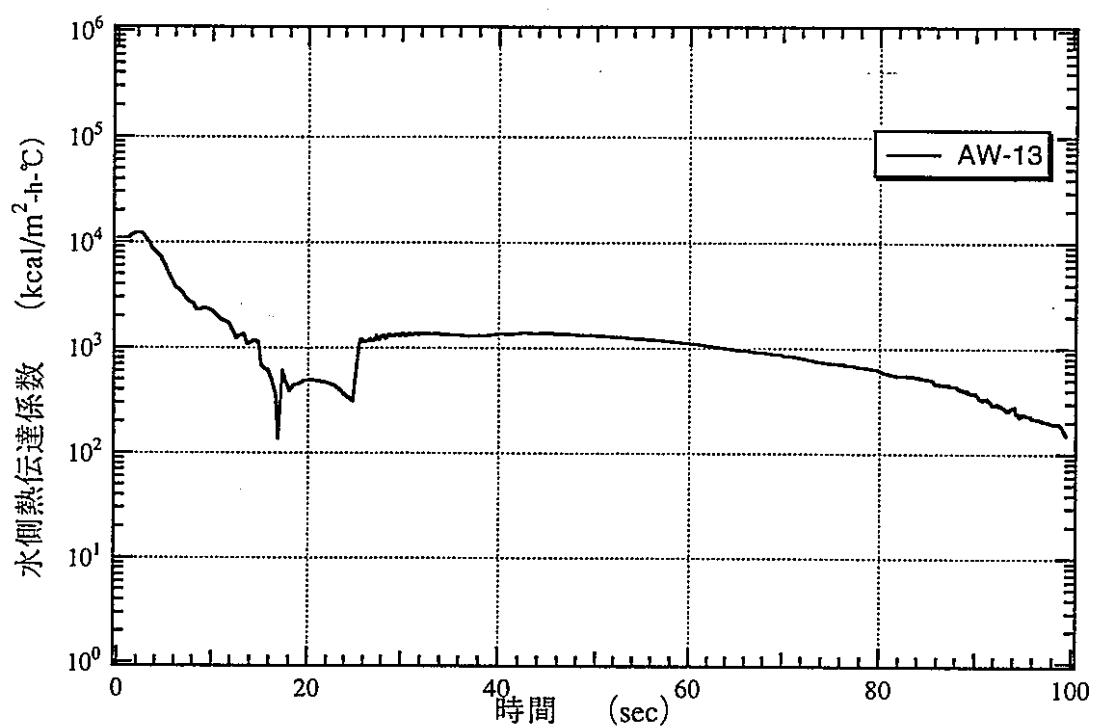


ケース 1 (BLOOPH)

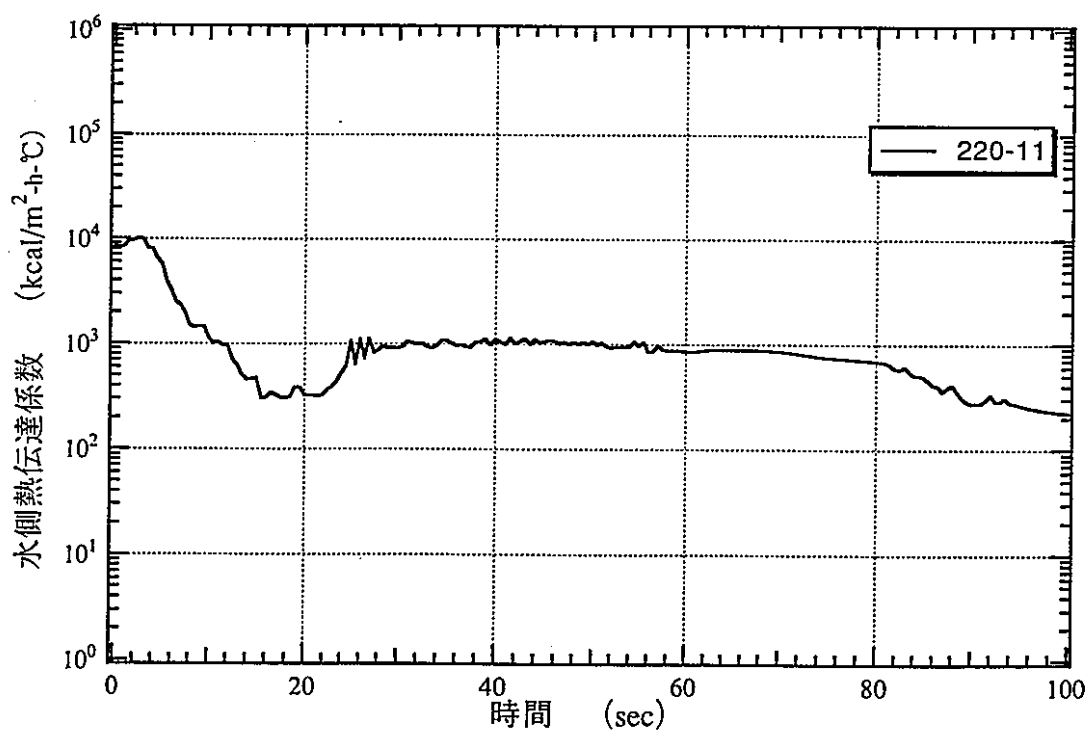


ケース 1 (RELAP)

図4.3-21 EV コイル熱伝達係数変化 (10/12) (定格運転状態からのブロー)



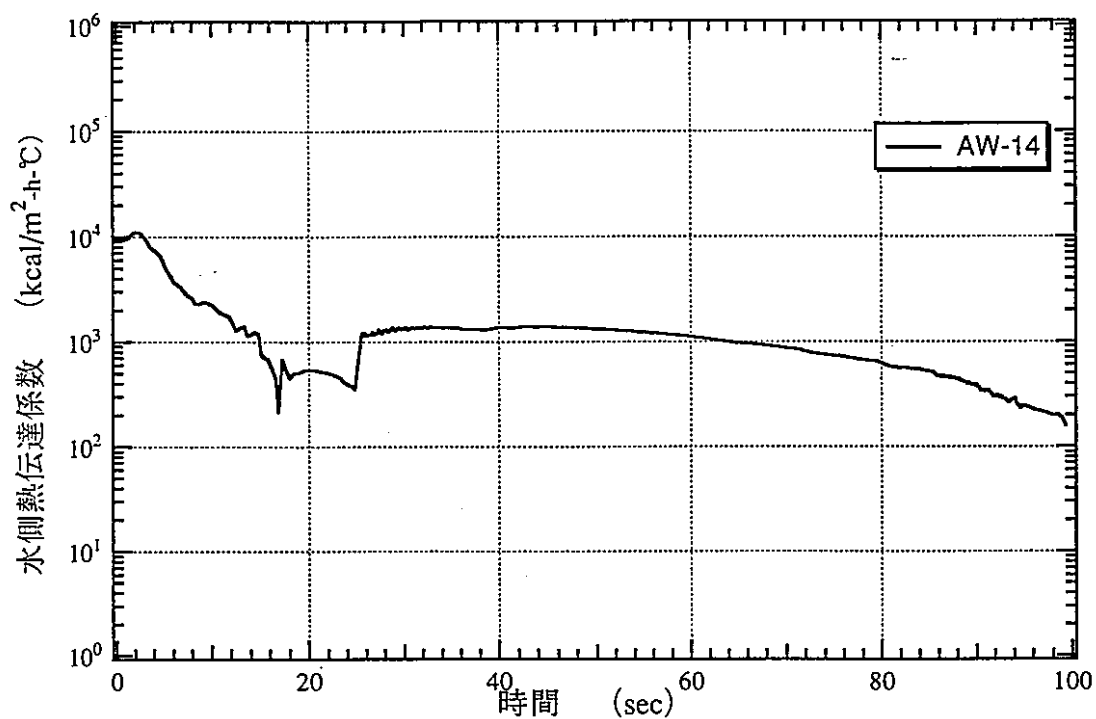
ケース 1 (BLOOPH)



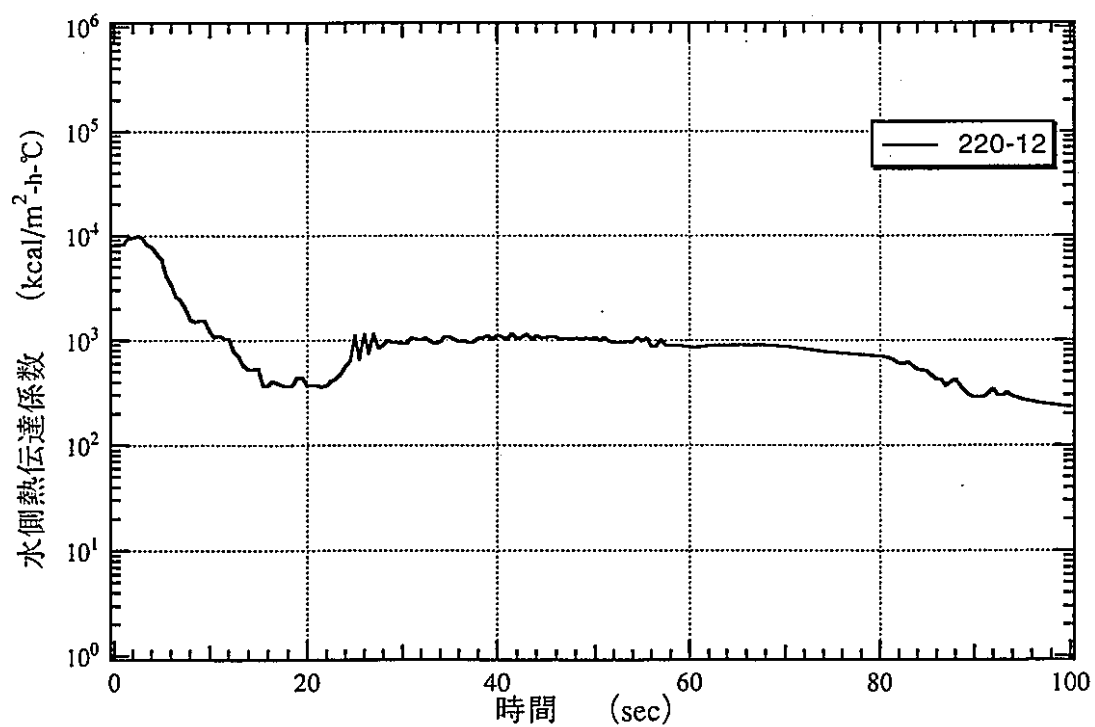
ケース 1 (RELAP)

図4.3-22 EV コイル熱伝達係数変化 (11/12) (定格運転状態からのブロー)





ケース 1 (BLOPH)



ケース 1 (RELAP)

図4.3-23 EV コイル熱伝達係数変化 (12/12) (定格運転状態からのブロー)

#### 4.4 RELAP5/Mod.2 による水ブロー解析のまとめ

本章では、非平衡・非均質モデルの汎用熱流動解析コード RELAP5 / Mod.2 を用い、定常計算及びブローダウン解析を実施し、均質平衡二相流モデルの BLOOPH の解析結果との比較検討を行った。

なお、RELAP5 の場合、FBR 用 SG 水ブロー解析への適用は初めてであり、各放出弁の流出係数は定まっていない。ここでは、両コードのモデルの違いが、ブロー中の SG 伝熱管内流動に及ぼす影響を見ることを主眼に、BLOOPH による初期の放出流量と合うように各放出弁の流出係数を設定した。

主要な比較検討結果は以下の通りである。

- ① RELAP5 の解析では放出弁とブロー配管出口で臨界流が生じる。但し今回対象とした体系、条件では SG 内挙動は放出弁の臨界流に支配され、ブロー配管出口の臨界流には依存しない。

ブロー配管出口で臨界流により、同配管内の圧力は上昇するものの、放出弁の臨界条件に影響を与えるまでには至らず、その上流の SG 内の挙動には影響が波及しないからである。

- ② RELAP5 の解析結果は、BLOOPH の結果と比較して、圧力、流動挙動は概ね一致する。特に BLOOPH の結果で見られた極低流量域の発生が、RELAP5 の解析でも見られている。

- ③ ブロー後半部分で、RELAP5 の方が圧力降下がやや遅くなること、また、ダウンカマ部、管束下部でのクオリティにやや差が生じるが、基本的には流動モデルの差或いは、臨界流モデルの差によるものと考えられる。

- ④ RELAP5 は軽水炉 LOCA 解析等には広く使用されて来ているものの、Na 加熱 SG の水ブロー現象に対しては、使用経験は少ない。従って、今後は、以下の R&D が必要である。

- (a) Na 側から水／蒸気側への入熱を適切に評価するため、Na の物性値データ、熱伝達モデルを組み込む等、RELAP5 の改修の実施。
- (b) 水側熱伝達率評価モデルとしてヘリカル型伝熱管も考慮できる様、試験及びコードの改修の実施。
- (c) Na 加熱 SG の水ブロー実験解析による流出係数の確認。

## 5. まとめ

本作業では、SG 伝熱管健全性評価に必要な除熱条件を定めることを目的に主に水蒸気放出系設備仕様や運転条件をパラメータにした解析を行った。それらの主な結果は以下の通りである。

- (1) 放出弁容量等をパラメータとした BLOOPH による水ブロー解析により、それらを変更した場合のブロー特性の変化を把握できた。特にブロー途中の伝熱管内極低流量域発生の原因を推定し、出口放出弁容量／入口放出弁容量の比を大きくすることにより、その影響を緩和できる見通しを得た。
- (2) また、放出系容量の最適設定手法を案出することが出来た。
- (3) 今回の EV-SH 分離体系では、SH 入口止弁の閉止開始時刻を遅らすことが、上記極低流量発生抑制に効果があることが判った。
- (4) BLOOPH による水ブロー解析結果（水蒸気状態量）を、Na - 水反応による加熱を考慮して補正を行った。補正は過度に保守的になること（温度が上がる）を避けるため、過渡モデルにより行った。

また、それらの補正結果を伝熱管健全性評価用に提示した。

- (5) 補正の際の水側熱伝達率相関式として、（水リーク検出・）ブロー前の水側流量の比較的大きい条件では、旋回流効果が期待できるものとして SG 設計式を用いたが、Na-水反応時の高熱流束の条件下でもこの SG 設計式の使用が適切か否か、今後試験による確認が必要である。また、ブロー中は、保守的に LOCA 式を適用したが、ヘリカルコイル型伝熱管に対する適用性についても試験による確認が望ましい。
- (6) 非平衡・非均質モデルの汎用熱流動解析コード RELAP5 / Mod.2 を用い、定常計算及びブローダウン解析を実施し、均質平衡二相流モデルの BLOOPH の解析結果との比較検討を行った。

その結果、RELAP5 と BLOOPH の解析結果は、圧力及び流動挙動に関し、概ね一致した。このことは BLOOPH の結果の妥当性を示すものと言える。

- (7) 今後、実機で予定されているブロー試験の結果により、これら解析結果の妥当性を最終的に確認すると共に、必要なモデル改良による解析精度の向上が必要である。

## 6. 謝辞

本作業の実施に当たって、動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター安全工学部プラント安全工学室の田辺裕美室長、浜田広次副主任研究員、栗原成計研究員には数々のご指導並びにご助言を頂きました。

ここに深く感謝の意を表します。

## 7. 参考文献

- 1) 遠藤ほか、“もんじゅ模擬制御性関連試験 - Na - 水反応時 SG まわりの運転法の検討 - (Na - 水反応時のSGブロー及びN<sub>2</sub>置換法) ”、PNC SJ206 80-19、(1980).
- 2) 高速炉エンジニアリング、“実機熱過渡解析用プラントシステムデータ”、EP-B0051R5  
( 三菱重工業ほか、“高速増殖炉もんじゅ発電所 運用計画に係わる検討 (高次Pu 利用検討) ”、PNC ZJ1449 92-011にも同内容のデータが含まれている )
- 3) 吉岡直樹ほか、“ナトリウム - 水反応時の伝熱管内温度・圧力計算”、DR-604-0171 (新型炉技術開発 (株) 分類番号)、平成 6 年 12 月

## 添付資料A 解析コードBLOOPHの概要

【 解析コードBLOOPHの概要について述  
べる。 】

A - 1

a) ナトリウムに関する式

$$M_{Nj} \frac{dH_{Nj}}{dt} = W_N (H_{Ni} - H_{Nj}) - Q_N + U_{Nij} A_{Nij} (T_{Ni} - T_{Nj})$$

b) 伝熱管に関する式

$$M_{ti} C_{pt} \frac{dT_{ti}}{dt} = Q_{Ni} - Q_i$$

c) シェル・センタパイプ等に関する式

$$M_{Si} C_{Ps} \frac{dT_{Si}}{dt} = U_{Si} A_{Si} (T_{Ni} - T_{Si})$$

但し、

$$Q_i = \frac{Ac (T_{ti} - T_i)}{\left(\frac{1}{\alpha_F} + \frac{1}{\alpha_W}\right) \frac{dc}{di} + \frac{dc}{2\lambda_t} \ln \frac{dc}{di}}$$

$$Q_N = \frac{Ac (T_{Ni} - T_{ti})}{\frac{dc}{do} \cdot \frac{1}{\alpha_N} + \frac{dc}{2\lambda_t} \cdot \ln \frac{dc}{do}}$$

## A-2 境界条件

(1) 水／蒸気側

a) 破断口（ブロー口）バウンダリ

各ノードについて任意に設ける事が出来る。各ノード内圧力及びエンタルピにより、臨界流量を計算してブロー流量を模擬する。

b) 流量バウンダリ

給水流量等、外部からの水の流入がある場合等を模擬する。この場合、流入流量及び流入水エンタルピ、クォリティーを時間の関数で外部入力する。

c) 圧力バウンダリ

任意のノードについて、境界圧力条件を設定する。

この場合、圧力及びエンタルピを時間の関数で外部入力する。

(2) ナトリウム側

a) 流量バウンダリ

SH入口におけるナトリウム温度と流量を時間の関数で外部入力する。



### A-3 数値計算方法

#### (1) 水/蒸気側

各保存則を連立させ完全陰解法で解く。

$$[I - h dF^n(t^n, y^n)] \Delta y^{n+1} = h F^n(t^n, y^n)$$

$t$  : 時間

$h$  : 時間メッシュ巾

$\Delta y^{n+1}$  :  $h$  の間の増分ベクトル

$$\Delta y^{n+1} = \begin{bmatrix} \Delta W_1 \\ \vdots \\ \Delta W_k \\ \Delta U_1 \\ \vdots \\ \Delta U_N \\ \Delta M_{g1} \\ \vdots \\ \Delta M_{gN} \\ \Delta M_{f1} \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta M_{fN} \end{bmatrix} \quad F^n = \begin{bmatrix} W_1 \\ \vdots \\ W_k \\ U_1 \\ \vdots \\ U_N \\ M_{g1} \\ \vdots \\ M_{gN} \\ M_{f1} \\ \vdots \\ \vdots \\ M_{fN} \end{bmatrix}$$

$F^n$  : 微係数ベクトル

$dF^n$  :  $F^n$  の Jacobian

$$dF^n = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial W_1} & \frac{\partial F_1}{\partial W_2} & \cdots & \frac{\partial F_1}{\partial M_{fN}} \\ \vdots & & & \\ \frac{\partial F_k}{\partial W_1} & \cdots & & \\ \frac{\partial F_{k+1}}{\partial W_1} & \cdots & & \\ \vdots & & & \\ \frac{\partial F_{k+N+1}}{\partial W_1} & \cdots & & \\ \vdots & & & \\ \frac{\partial F_{k+3N}}{\partial W_1} & \cdots & \frac{\partial F_{k+3N}}{\partial M_{fN}} \end{bmatrix}$$

$I$  :  $k+3N$  次の単位マトリックス

(2) ナトリウム側

各エネルギー式を連立させ二次のルンゲクッタ法で陽的に解く。

尚、Fig. A-1 に計算手順の概要を示す。

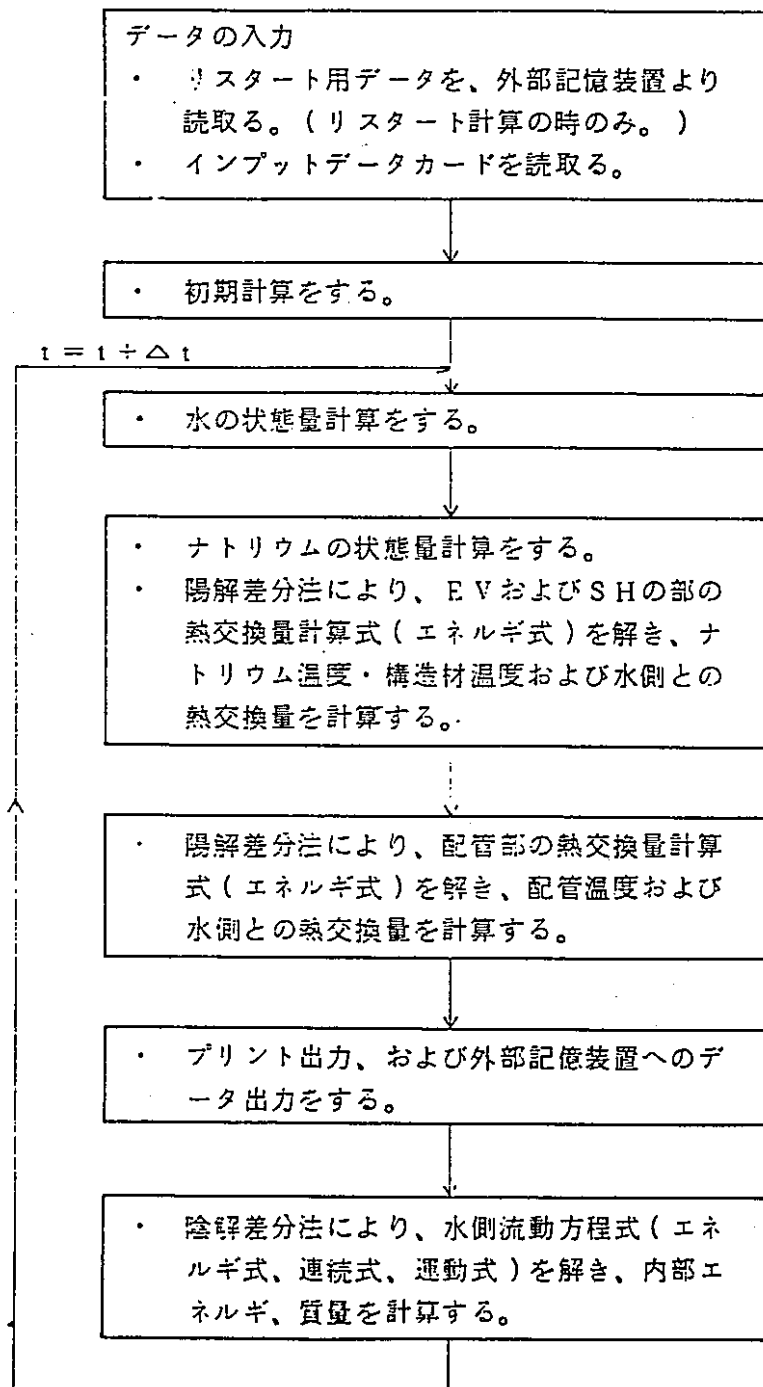


Fig. A-1 Flow Chart of "BLOOPH" Code Main Program  
"BLOOPH" 計算手順の概要

#### A-4 随 伴 式

(1) 水／蒸気系の圧力損失に関する扱い。

a) 摩擦損失係数 (コールブルックの式)

$$\frac{1}{\sqrt{f_k}} = -2 \log \left[ \frac{\varepsilon/D}{3.71} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right]_k$$

但し、

$$\begin{cases} Re_k = \left[ \frac{D}{\mu_f} (1-x) \frac{W}{A} \right]_k & (\text{二相時}) \\ Re_k = \left[ \frac{D \cdot W}{\mu_A} \right]_k & (\text{単相時}) \end{cases}$$

b) 二相増倍係数 (マルチネリ・ネルソンの式)

二相時

$$\phi^2 = \phi_0^2 (1-x)^{1.75}$$

$$\phi_0^2 = \left( 1 + \frac{1}{x_{tt}^{0.636}} \right)^{2.75}$$

$$x_{tt} = \left( \frac{1-x}{x} \right) \left( \frac{\mu_f}{\mu_g} \right)^{0.143} \left( \frac{V_f}{V_g} \right)^{0.571}$$

単相時

$$\phi^2 = 1$$

c) 形状圧損係数

$$\xi = 0.5 (1 - A_j / A_i) \quad (\text{縮流})$$

$$\xi = (1 - A_i / A_j)^2 \quad (\text{拡流})$$

但し、 $A_i$  ; 上流側流路断面積

$A_j$  ; 下流側流路断面積

d) スリップ比

(i) 関数形で扱う場合 (Ahmad の式)

$$S = (V_g / V_f)^{0.205} (G D e / \mu_f)^{-0.016}$$

$$G = W / A$$

但し、給水ヘッダー部に対しては、次式とする。

$$S = (V_g / V_f)^{0.8}$$

(ii) 入力する場合

各リンク毎に外部入力データで与える。

(2) 臨界流量

a) 水単相流 (Henry-Fauske モデル)

データテーブルを使用。

b) 二相流 (Moody モデル)

データテーブルを使用。

c) 蒸気単相流 (断熱噴流の式)

$$(P_j \geq P_{ci})$$

$$W_c = A_k C_D^{\text{SUP}} \sqrt{2g \frac{K}{K-1} \frac{P_i}{V_i} \left\{ \left( \frac{P_j}{P_i} \right)^{2/K} - \left( \frac{P_j}{P_i} \right)^{\frac{K+1}{K}} \right\}}$$

$$(P_j < P_{ci})$$

$$W_c = A_k C_D^{\text{SUP}} \sqrt{2g \frac{K}{K-1} \frac{P_i}{V_i} \left\{ \left( \frac{2}{K+1} \right)^{2/K-1} - \left( \frac{2}{K+1} \right)^{\frac{K+1}{K-1}} \right\}}$$

$$P_{ci} = \left( \frac{2}{K+1} \right)^{\frac{K}{K+1}} \cdot P_i$$

但し、

$K$  ; 比熱比

$C_D$  ; 流量係数

(3) 熱伝達式

a) 水/蒸気側

(i) 沸騰領域 (Rohsenow の式)

$$C_{Boil} = \frac{U_f h_{fg}}{\sqrt{\frac{\sigma}{r_f - r_g}}} \left[ \frac{C_{pf}}{0.013 h_{fg} Pr_f^{1.7}} \right]^3$$

$$\alpha_w = C_{Boil} (T_{scale} - T_{sat})^2$$

(ii) 管束部水単相領域 (森・中山の液相の式)

$$Nu = \frac{1}{41} \frac{Pr}{Pr^{0.6} - 0.062} Re^{\frac{5}{6}} \left( \frac{d_i}{D} \right)^{\frac{1}{12}} \left[ 1 + \frac{0.061}{\left\{ Re \left( \frac{d_i}{D} \right)^{2.5} \right\}^{\frac{1}{6}}} \right]$$

$$\alpha_w = \frac{\lambda}{d_i} Nu$$

(iii) 管束部過熱蒸気領域 (森・中山の気相の式)

$$Nu = \frac{1}{26.2} \frac{Pr}{Pr^{2/3} - 0.074} Re^{\frac{4}{5}} \left( \frac{d_i}{D} \right)^{\frac{1}{10}} \left[ 1 + \frac{0.098}{\left\{ Re \left( \frac{d_i}{D} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{5}}} \right]$$

$$\alpha_w = \frac{\lambda}{d_i} Nu$$

(iv) ダウンカマ部 (Dittus-Boelter の式)

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

$$\alpha_w = \frac{\lambda}{d_i} Nu$$

b) ナトリウム側 (Hoe の式)

$$\alpha_N = \frac{\lambda_N}{d_o} \left\{ 4.03 + 0.228 (Re_N \cdot Pr_N)^{\frac{2}{3}} \right\}$$

(4) 状態方程式及び物性値

a) 水の状態方程式

水側の流動方程式を解いて得られる、内部エネルギー(U)と質量(M)より、水の状態方程式は次式で表わせる。

$$P = \Gamma(U, M)$$

即ち、上式は次の様に扱う事が出来る。

$$\text{比内部エネルギー} \quad ; \quad u = U/M$$

$$\text{比容積} \quad ; \quad V = \text{ノード内容積} / M$$

より、(u、V)の2変数から、水の状態量を求める。水の状態量計算は、水蒸気データテーブルを使用する。

(i) 水蒸気データテーブルの内容

① 飽和水・飽和蒸気の物性値テーブル (温度の関数)

- 温度の範囲      273.16 ~ 647.3 °K
- "     点数      40点 (10°K間隔)
- データの種類    ・ 圧力                      Psat (Pa)

|            |                    |               |
|------------|--------------------|---------------|
| ・ 比容積      | $V_f, V_g$         | ( $m^3/kg$ )  |
| ・ 比内部エネルギー | $U_f, U_g$         | ( $J/kg$ )    |
| ・ 熱膨張係数    | $\beta_f, \beta_g$ | ( $K^{-1}$ )  |
| ・ 等温圧縮率    | $K_f, K_g$         | ( $Pa^{-1}$ ) |
| ・ 定圧比熱     | $C_{pf}, C_{pg}$   | ( $J/kg$ )    |

㊦ 飽和水・飽和蒸気の物性値テーブル ( 圧力の関数 )

|          |                                        |                                   |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------------|
| ○ 圧力の範囲  | $2000 \sim 2.2 \times 10^7 \text{ Pa}$ |                                   |
| ○ " 点数   | 27点                                    |                                   |
| ○ データの種類 | ・ 温度                                   | $T_{sat} \quad (^{\circ}K)$       |
|          | ・ 比容積                                  | $V_f, V_g \quad (m^3/kg)$         |
|          | ・ 比内部エネルギー                             | $U_f, U_g \quad (J/kg)$           |
|          | ・ 熱膨張係数                                | $\beta_f, \beta_g \quad (K^{-1})$ |
|          | ・ 等温圧縮率                                | $K_f, K_g \quad (Pa^{-1})$        |
|          | ・ 定圧比熱                                 | $C_{pf}, C_{pg} \quad (J/kg)$     |

㊧ 単相域の物性値テーブル ( 温度と圧力の関数 )

|           |                                        |                        |
|-----------|----------------------------------------|------------------------|
| ○ 温度、圧力範囲 | $273.15 \sim 1073.1 \text{ }^{\circ}K$ |                        |
|           | $2000 \sim 2.5 \times 10^7 \text{ Pa}$ |                        |
| ○ " の点数   | 温度                                     | 47点                    |
|           | 圧力                                     | 29点                    |
| ○ データの種類  | ・ 比容積                                  | $V \quad (m^3/kg)$     |
|           | ・ 比内部エネルギー                             | $U \quad (J/kg)$       |
|           | ・ 熱膨張係数                                | $\beta \quad (K^{-1})$ |
|           | ・ 等温圧縮率                                | $K \quad (Pa^{-1})$    |
|           | ・ 定圧比熱                                 | $C_p \quad (J/kg)$     |

㊨ その他

伝熱計算に必要な物性値を、J S M E 蒸気表よりテーブルを追加してある。

熱伝導率  $\lambda \quad (kcal/m)$

静粘性係数  $\mu \quad (kg/m \cdot s)$

b) ナトリウムの状態方程式

A N L - 7 3 2 3 の式による。

A - 5 その他の取扱い

(1) ヒートスラブ

水と配管との熱伝達計算を行なうものであり、今回の解析で新たに追加した。

a) エネルギー式

$$C_p \cdot M_{HS} \frac{dT_{HS}}{dt} = Q_{SH}$$

$$A_{HS} \frac{(T_W - T_{HS})}{\frac{1}{\alpha_{HS}} - \frac{1}{\alpha_{HSW}}} = Q_{SH}$$

b) 水の熱伝達式

(i) 水単相及び過熱蒸気領域 (Dittus Boelter の式)

A - 4 (3) を参照の事

(ii) 2 相領域 (Schrock Grossman の式)

$$\alpha_{HSW} = 0.0575 \cdot \frac{\lambda}{De} \cdot Pr_f^{0.4} \{ Re_f (1-x) \}^{0.8} \\ \times \left\{ \left( \frac{x}{1-x} \right)^{0.9} \left( \frac{\mu_g}{\mu_f} \right)^{0.1} \left( \frac{V_g}{V_f} \right)^{0.5} \right\}^{0.75}$$

尚、配管の熱伝達率は外部入力する。任意の配管部ノードについて、ヒートスラブモデルを適用出来る。

(2) Water Packing

ループ内を水単相と二相が混在している液体を取扱う場合には、計算上の不安定性 (圧力スパイク) の問題が起きる事がある。これは、有限の時間巾と、二相から液相の状態に移移する際に、質量変化について二相流の圧力勾配の緩慢性に対し、液相の急勾配の圧力変化の特性から、相変化の際に起きるものである。これに対処するために、圧力スパイクの起きたノードに対し、次の様に圧力とエンタルピの再設定を行なう。余剰分となる内部

$$P' = P_{sat} * 1.001$$

$$H' = h_f$$

エネルギーと質量は、隣接するノードの中で最も比容積の大きいノードに振り当てて、この2つのノードの状態量を計算仕直す。

### (3) 弁の模擬

弁の開閉に伴う、抵抗値の変動を時間の関数で外部入力して、弁の模擬を行なう。具体的には、水/蒸気側の運動量式の摩擦抗 $\xi$ を時間の関数で変更させて取扱う。

### 記号の説明

|                  |   |                   |                        |
|------------------|---|-------------------|------------------------|
| Mg               | ; | ノード内蒸気量           | [ kg ]                 |
| Mf               | ; | " 水気量             | [ kg ]                 |
| X                | ; | クォリティー            | [ - ]                  |
| U <sub>i</sub>   | ; | 内部エネルギー           | [ kcal ]               |
| H                | ; | 比エンタルピー           | [ kcal/kg ]            |
| Q                | ; | 入熱                | [ kcal/sec ]           |
| T <sub>i</sub>   | ; | 入口側流路の集合          | [ - ]                  |
| I <sub>i</sub>   | ; | 出口 "              | [ - ]                  |
| K <sub>i·j</sub> | ; | 運動量係数             | [ m <sup>3</sup> /kg ] |
| W <sub>kT</sub>  | ; | 上流側ノードの平均流量       | [ kg/sec ]             |
| W <sub>kI</sub>  | ; | 下 " "             | [ kg/sec ]             |
| A <sub>kT</sub>  | ; | 上 " 流路断面積         | [ m <sup>2</sup> ]     |
| A <sub>kI</sub>  | ; | 下 " "             | [ m <sup>2</sup> ]     |
| V <sub>k</sub>   | ; | 流路内流体比容積 (上流側で代表) | [ m <sup>3</sup> /kg ] |
| Z <sub>i·j</sub> | ; | ノード中心高さ           | [ m ]                  |
| $\rho_s$         | ; | 断面変化時における変化後の密度   | [ kg/m <sup>3</sup> ]  |
| U <sub>s</sub>   | ; | " 後の流速            | [ m/sec ]              |
| $\rho_k$         | ; | " 前の密度            | [ kg/m <sup>3</sup> ]  |
| U <sub>k</sub>   | ; | " 前の流速            | [ m/sec ]              |
| C                | ; | 流体中音速             | [ m/sec ]              |
| W <sub>k</sub>   | ; | 流量                | [ kg/sec ]             |
| L <sub>k</sub>   | ; | ノード中心間距離          | [ m ]                  |
| P <sub>i·j</sub> | ; | 圧力                | [ kg/m <sup>2</sup> ]  |



|              |                              |                                   |
|--------------|------------------------------|-----------------------------------|
| $W_c$        | ； 臨界流量                       | $[kg/sec]$                        |
| $A_k$        | ； 流路断面積                      | $[m^2]$                           |
| $K$          | ； 比熱比                        | $[-]$                             |
| $V$          | ； 比容積                        | $[m^3/kg]$                        |
| $C_D$        | ； 流量係数                       | $[-]$                             |
| $U_N$        | ； ナトリウム側内部エネルギー              | $[kcal]$                          |
| $\gamma_N$   | ； " 比重量                      | $[kg/m^3]$                        |
| $C_N$        | ； " 定圧比熱                     | $[kcal/kg^\circ C]$               |
| $W_N$        | ； " 流量 ( $W_N = W_N(t)$ で入力) | $[kg/sec]$                        |
| $A_H$        | ； 伝熱面積 (肉厚中心基準)              | $[m^2]$                           |
| $M_t$        | ； 伝熱体重量                      | $[kg]$                            |
| $C_{pt}$     | ； " 比熱                       | $[kcal/kg^\circ C]$               |
| $T_{in,out}$ | ； ナトリウム側ノードの入口、出口温度          | $[^\circ C]$                      |
| $d_o$        | ； 伝熱体外面 (Na 面) 相当直径          | $[m]$                             |
| $d_c$        | ； " 肉厚中心 "                   | $[m]$                             |
| $d_i$        | ； " 内面中心                     | $[m]$                             |
| $U_f$        | ； 飽和水静粘性係数                   | $[kg/m \cdot s]$                  |
| $h_{fg}$     | ； 蒸発潜熱                       | $[kcal/kg]$                       |
| $\sigma$     | ； 表面張力                       | $[kg/m]$                          |
| $\gamma_f$   | ； 飽和水比重量                     | $[kg/m^3]$                        |
| $\gamma_g$   | ； 飽和蒸気比重量                    | $[kg/m^3]$                        |
| $C_{pf}$     | ； 飽和水比熱                      | $[kcal/kg^\circ C]$               |
| $Pr_f$       | ； 飽和水プラントル数                  | $[-]$                             |
| $T_{scale}$  | ； スケール温度                     | $[^\circ C]$                      |
| $T_{sat}$    | ； 飽和温度                       | $[^\circ C]$                      |
| $Re$         | ； レイノルズ数                     | $[-]$                             |
| $Pr$         | ； プラントル数                     | $[-]$                             |
| $\lambda$    | ； 熱伝導度                       | $[kcal/m \cdot s \cdot ^\circ C]$ |
| $\mu$        | ； 静粘性係数                      | $[kg/m \cdot s]$                  |
| $\lambda_N$  | ； ナトリウム熱伝導度                  | $[kcal/m \cdot s \cdot ^\circ C]$ |

|               |                                  |                                       |
|---------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| $Re_N$        | ； ナトリウムレイノズル数                    | [ - ]                                 |
| $Pr_N$        | ； ナトリウムプラントル数                    | [ - ]                                 |
| $\alpha_N$    | ； Na 側熱伝達係数                      | [ $Kcal/m^2 \cdot s \cdot ^\circ C$ ] |
| $\alpha_W$    | ； 水        "                     | [ $Kcal/m^2 \cdot s \cdot ^\circ C$ ] |
| $\alpha_F$    | ； 水側よごれ係数                        | [ $Kcal/m^2 \cdot s \cdot ^\circ C$ ] |
| $M_{HS}$      | ； ヒートスラブ重量                       | [ $kg$ ]                              |
| $T_{HS}$      | ；        "        温度             | [ $^{\circ}K$ ]                       |
| $A_{HS}$      | ；        "        伝熱面積           | [ $m^2$ ]                             |
| $\alpha_{HS}$ | ；        "        内部及び表面（汚れ）熱伝達率 | [ $Kcal/m^2 \cdot s \cdot ^\circ C$ ] |
| $Q_{HS}$      | ；        "        熱流束            | [ $Kcal/sec$ ]                        |

## 添付資料B 反応域での温度分布を考慮した場合の加熱補正計算

誠に勝手なお願いばかりで申しわけありません。  
温度分布を考慮した熱補正についてですが、可能なら以下のケースをお願いします。

- 1) 100%からの水ブロー
- 2) 40%からの水ブロー
- 3) 10%出力運転

現在、ナトリウム側の熱伝達率も見直しをしています。従って、前回お知らせした値(1)に加え、以下の値(2)でもお願いします。

| 温度    | (1)直線近似 | (2)データ上限値相当     |
|-------|---------|-----------------|
| 1000℃ | 10000   | 8600 kcal/m2hrC |
| 1100℃ | 6700    | 5000 kcal/m2hrC |
| 1150℃ | 5500    | 4000 kcal/m2hrC |
| 1200℃ | 4500    | 3500 kcal/m2hrC |

加熱補正計算モデル改良結果の件、Na側温度／熱伝達率分布を変えた以下の計算結果をお送りします。

| 計算条件           | 温度    | (1)直線近似              | (2)データ上限値相当          |
|----------------|-------|----------------------|----------------------|
|                | 1000℃ | 10000                | 8600 kcal/m2hrC      |
|                | 1100℃ | 6700                 | 5000 kcal/m2hrC      |
|                | 1150℃ | 5500                 | 4000 kcal/m2hrC      |
|                | 1200℃ | 4500                 | 3500 kcal/m2hrC      |
| 計算ケース          |       |                      |                      |
| 1) 100%からの水ブロー |       | ケース 1I (11日済み)       | ケース 1J <sup>*1</sup> |
| 2) 40%からの水ブロー  |       | ケース 6I <sup>*2</sup> | ケース 6J <sup>*2</sup> |
| 3) 10%出力運転     |       | 添付表参照 (各出口側 4 点の値)   |                      |

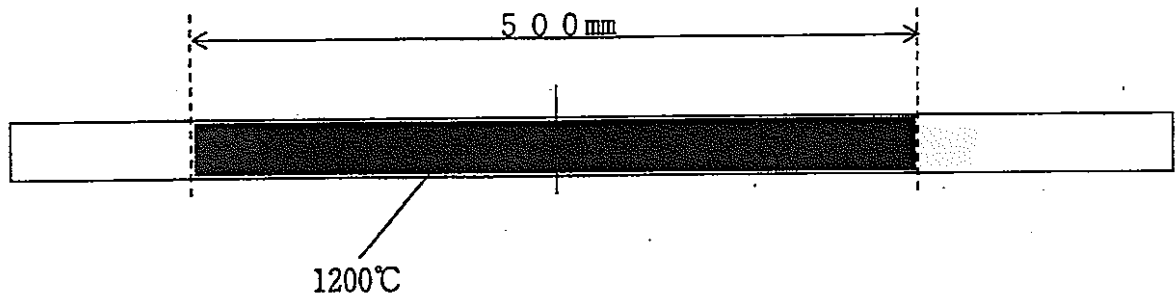
○ブローのケース (3B,4B 現状設計ベース)

\*1 ○ケース 1Jは、グラフ表示は厳しい点を表せるよう、温度領域毎、次葉に追記したメッシュ番号の各4点で表しました。

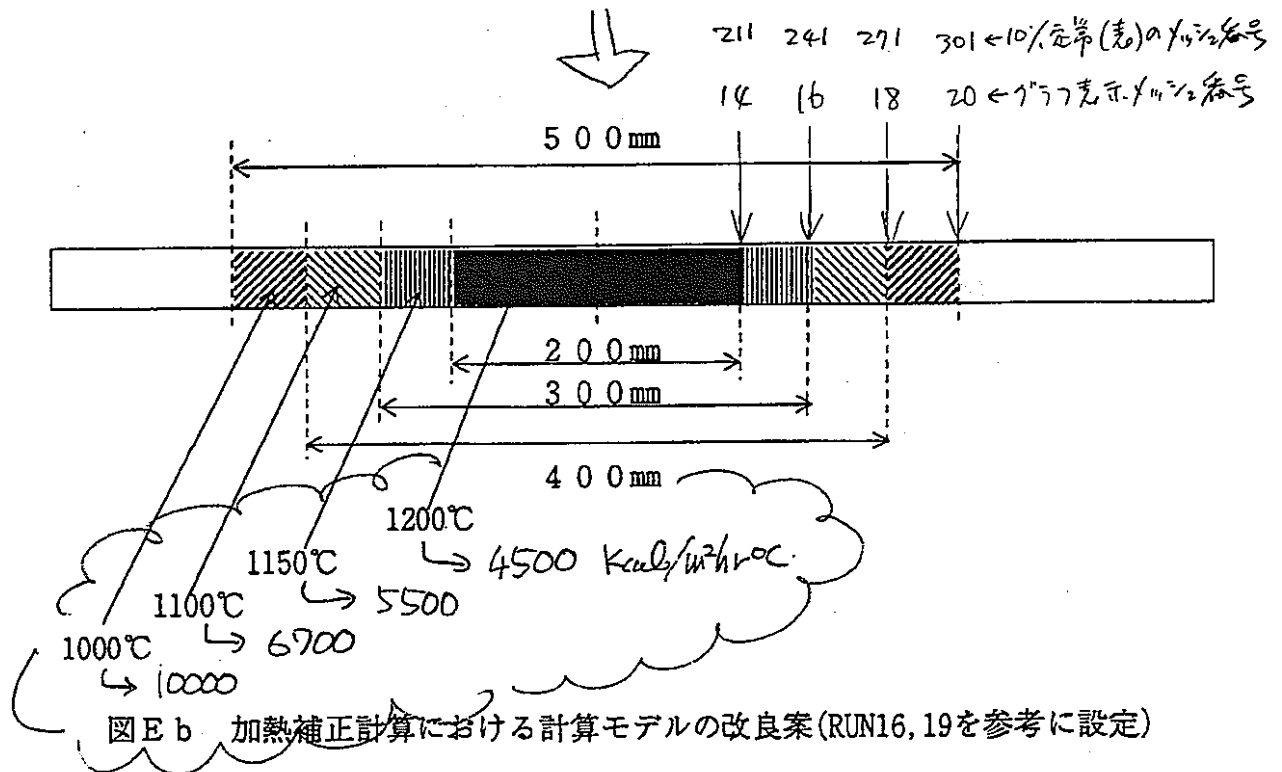
○1200度領域の出口側 (メッシュ番号14) が一番厳しくなるようなので、ブローケースのデジタル値はメッシュ番号14の値をお送りします。

\*2 ○ケース 6I、ケース 6Jのグラフ表示はメッシュ番号14のみとしました。

計算結果      次葉以下



図E a 従来の加熱補正計算における計算モデル(温度1200℃、加熱幅0.5m)



図E b 加熱補正計算における計算モデルの改良案(RUN16, 19を参考に設定)

ケース I

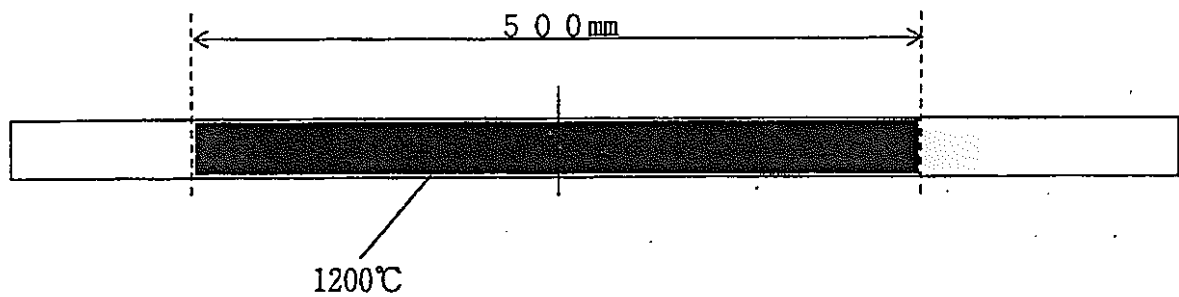
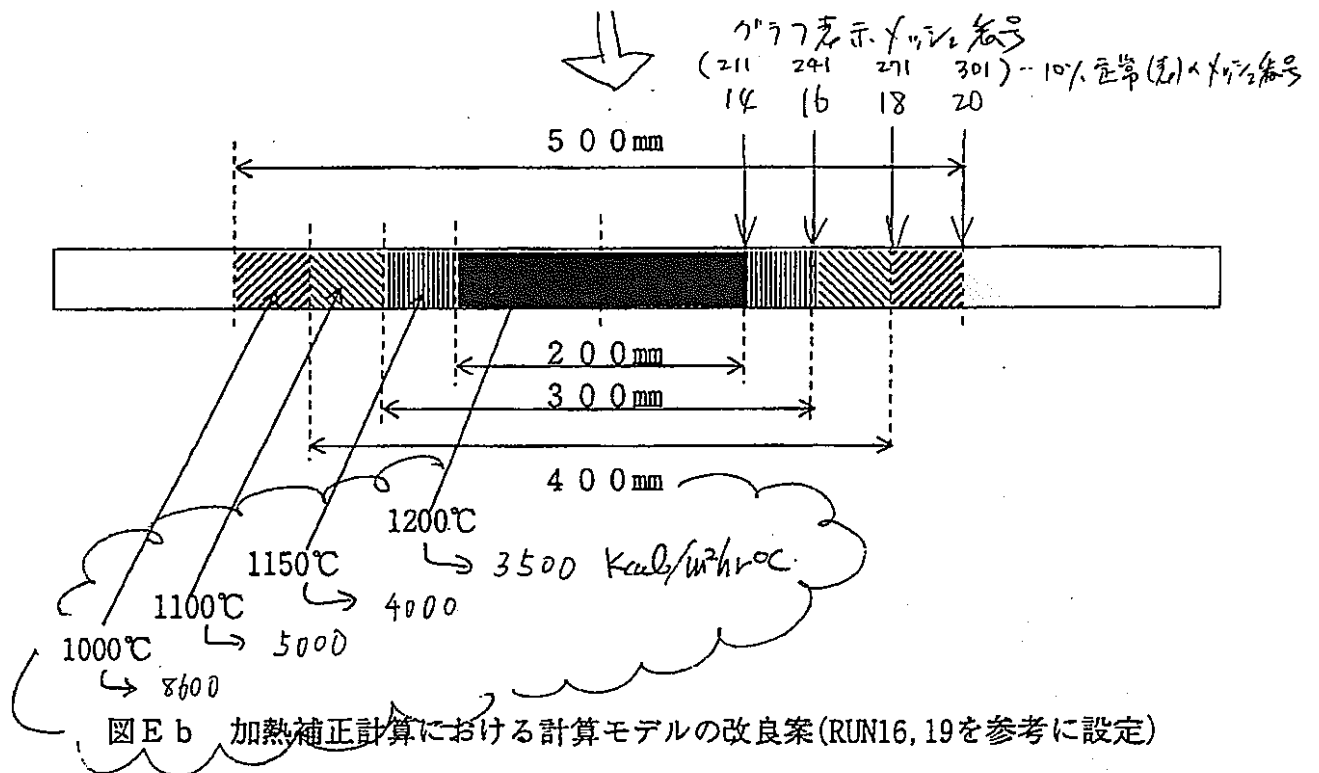


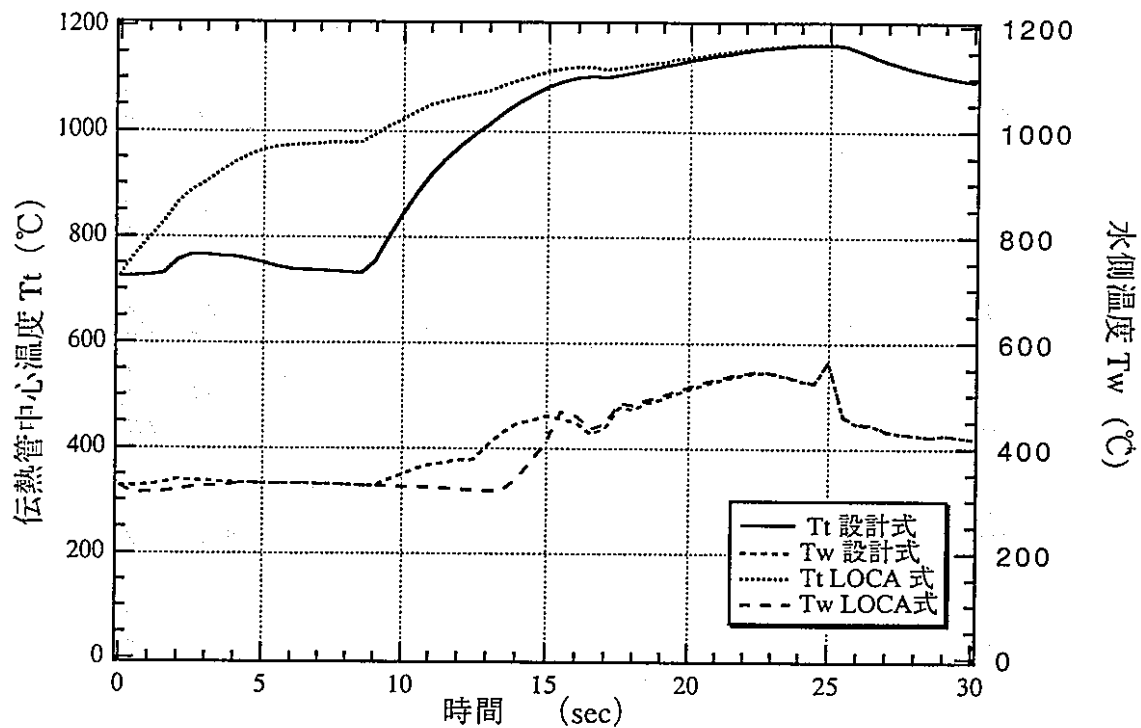
図 E a 従来の加熱補正計算における計算モデル(温度1200℃、加熱幅0.5m)



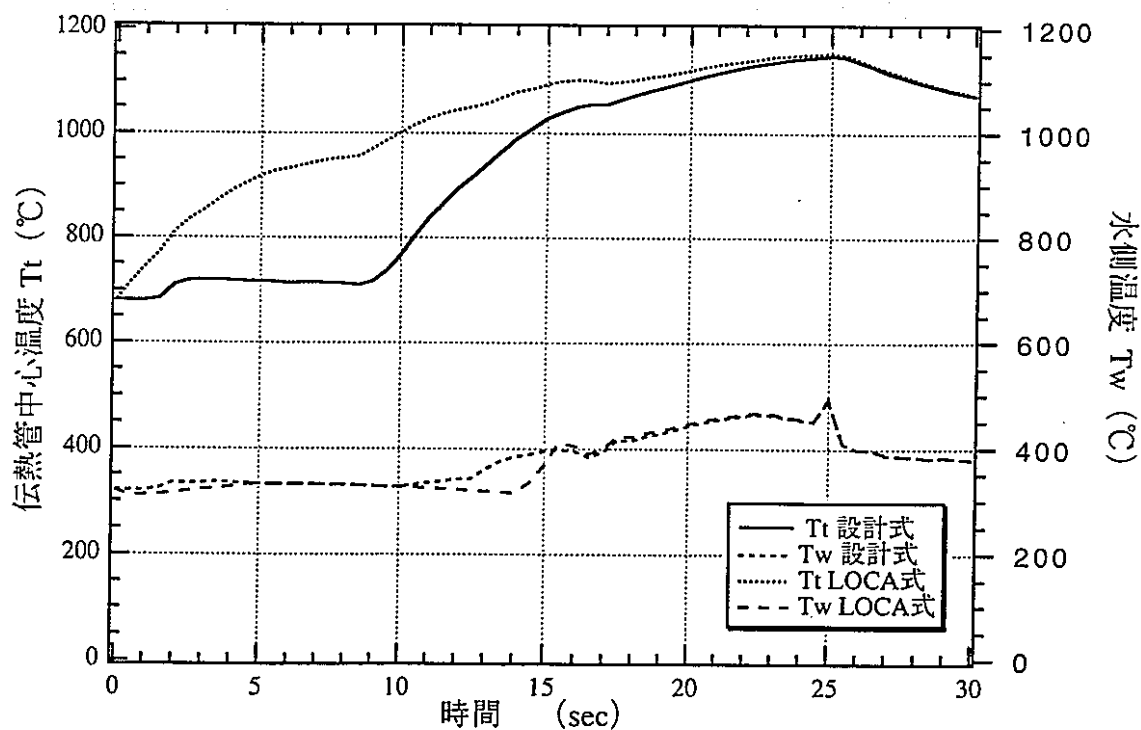
ケースJ

表 MjSGブロー解析ポスト処理(RUPIN)解析ケース

| 解析ケース名 | ブロー解析条件 |       | 反応条件サーベイパラメータ |                                 |          | 水側熱伝達式 | 出力  |
|--------|---------|-------|---------------|---------------------------------|----------|--------|-----|
|        | EV入口弁   | EV出口弁 | 反応温度(℃)       | 反応域熱伝達率(kcal/m <sup>2</sup> h℃) | 反応域長さ(m) |        |     |
| 1-A(1) | 3B      | 4B    | 1200          | 6000                            | 0.5      | 設計式    | 定格  |
| 1-A(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-B(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 定格  |
| 1-B(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-C(1) | 同上      | 同上    | 1100          | 8600                            | 0.5      | 設計式    | 定格  |
| 1-C(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-D(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 定格  |
| 1-D(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-E(1) | 同上      | 同上    | 1200          | 4500                            | 0.5      | 設計式    | 定格  |
| 1-E(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-F(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 定格  |
| 1-F(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-G(1) | 同上      | 同上    | 1100          | 6700                            | 0.5      | 設計式    | 定格  |
| 1-G(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-H(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 定格  |
| 1-H(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-I(1) | 同上      | 同上    | 1200~1000     | 4500~10000                      | 0.5      | 設計式    | 定格  |
| 1-I(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-J(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 3500~8600                       | 同上       | 設計式    | 定格  |
| 1-J(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 6-A(1) | 同上      | 同上    | 1200          | 6000                            | 0.5      | 設計式    | 40% |
| 6-A(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 40% |
| 6-B(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 40% |
| 6-B(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 40% |
| 6-C(1) | 同上      | 同上    | 1100          | 8600                            | 0.5      | 設計式    | 40% |
| 6-C(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 40% |
| 6-D(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 40% |
| 6-D(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 40% |
| 6-I(1) | 同上      | 同上    | 1200~1000     | 4500~10000                      | 0.5      | 設計式    | 40% |
| 6-I(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 40% |
| 6-J(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 3500~8600                       | 同上       | 設計式    | 40% |
| 6-J(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 40% |



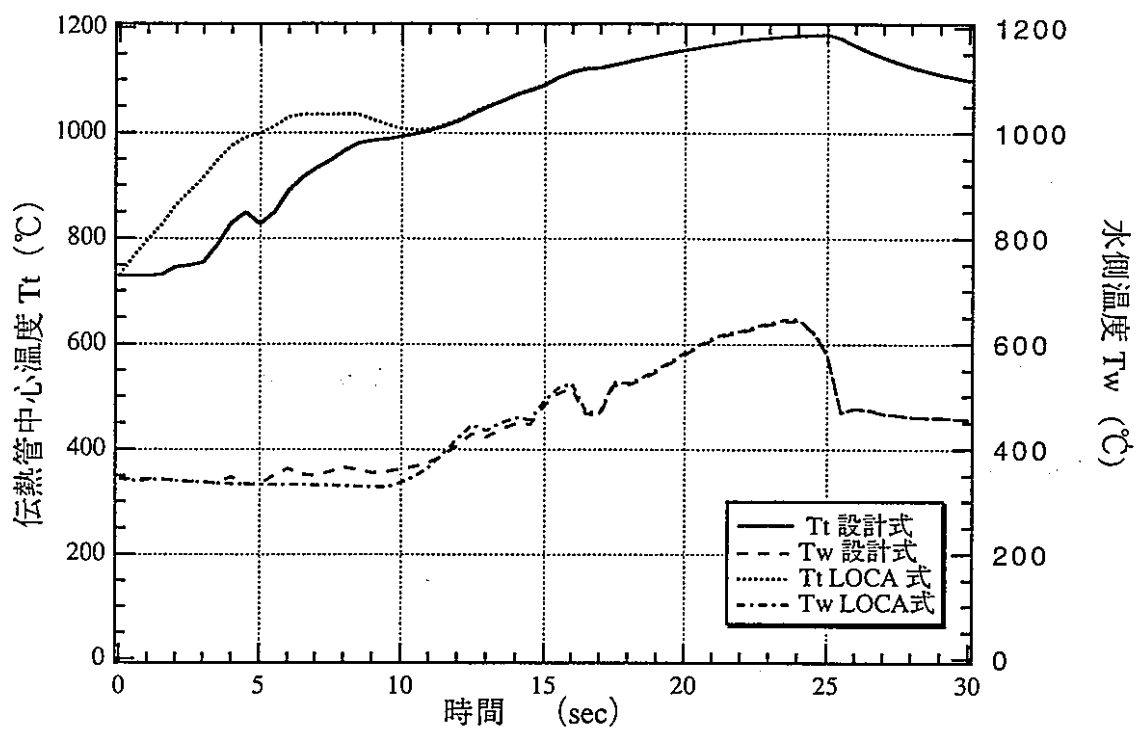
ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)



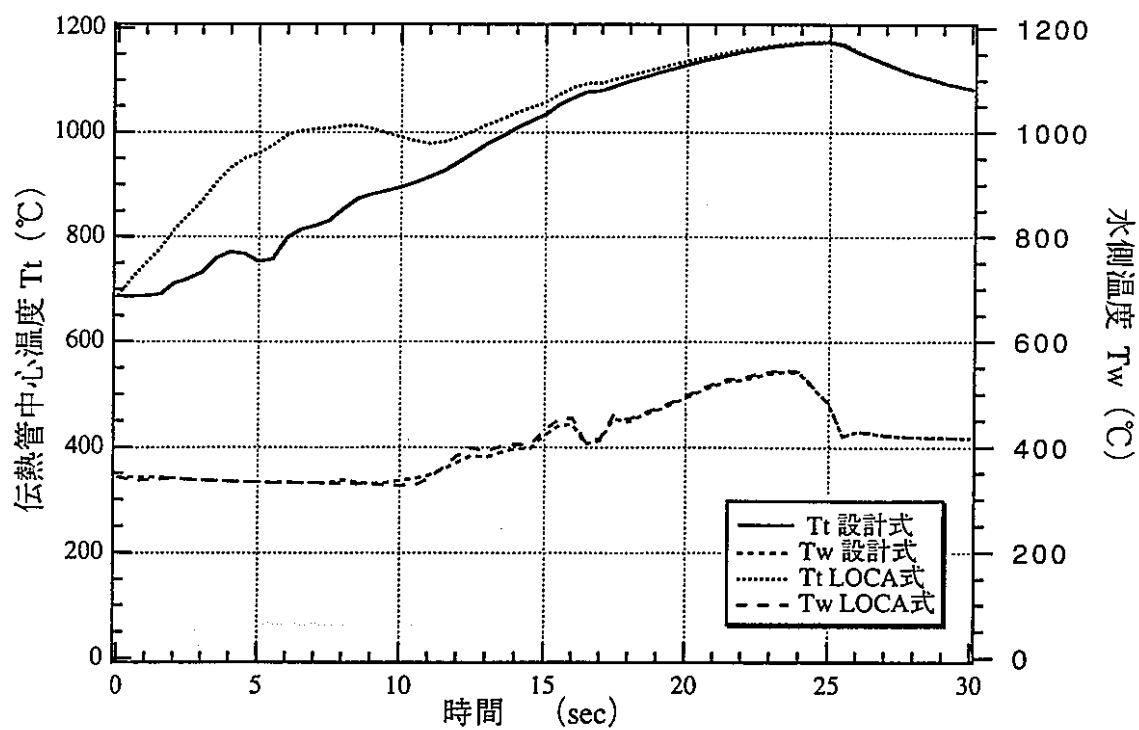
ケース1I (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (メッシュ番号14)

図 - 伝熱管中心温度と水側温度 (EVリンク 6)



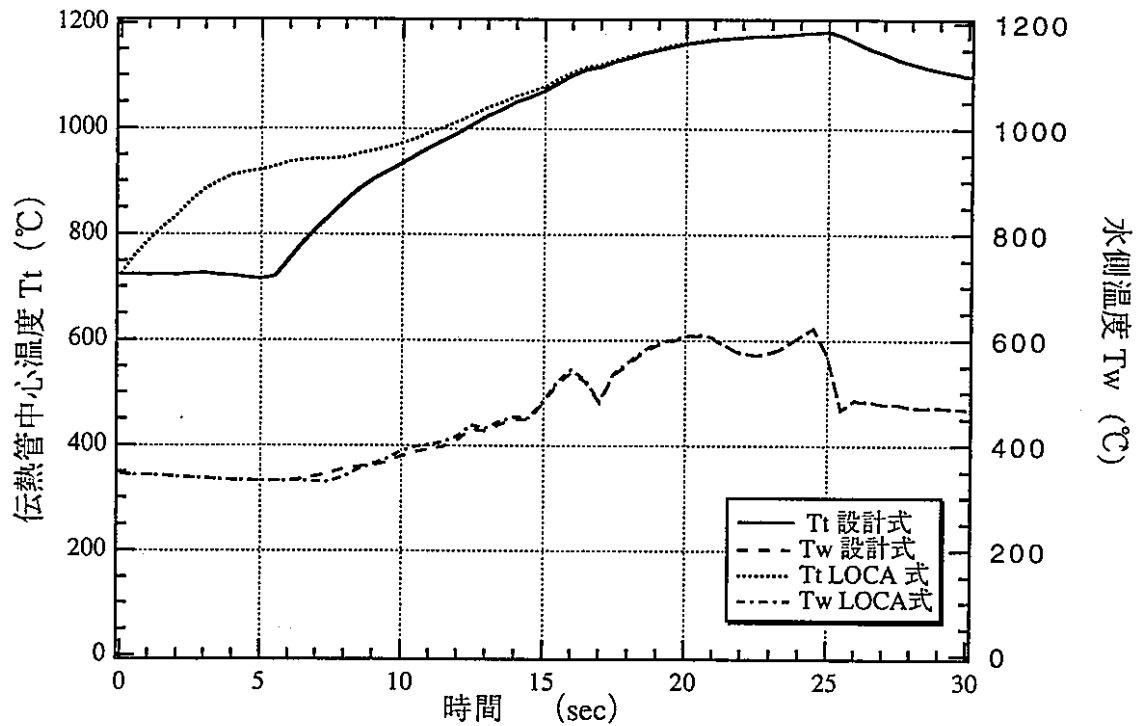


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

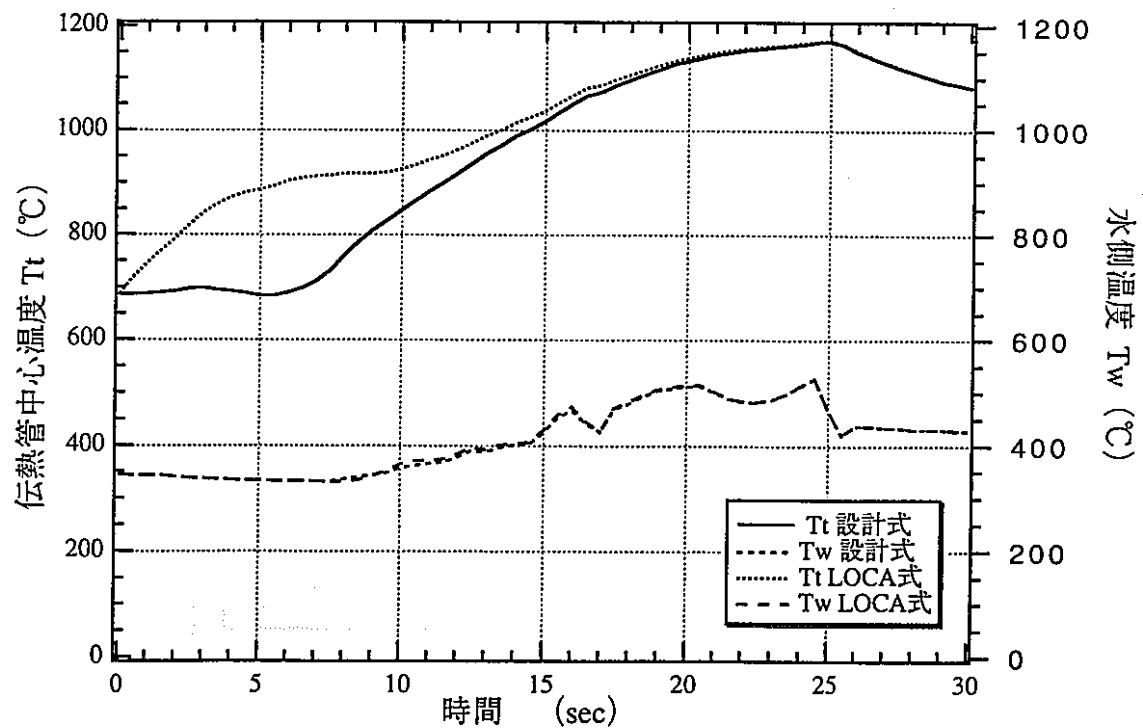


ケースII (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (メッシュ番号14)

図 - 伝熱管中心温度と水側温度 (EVリンク 8)

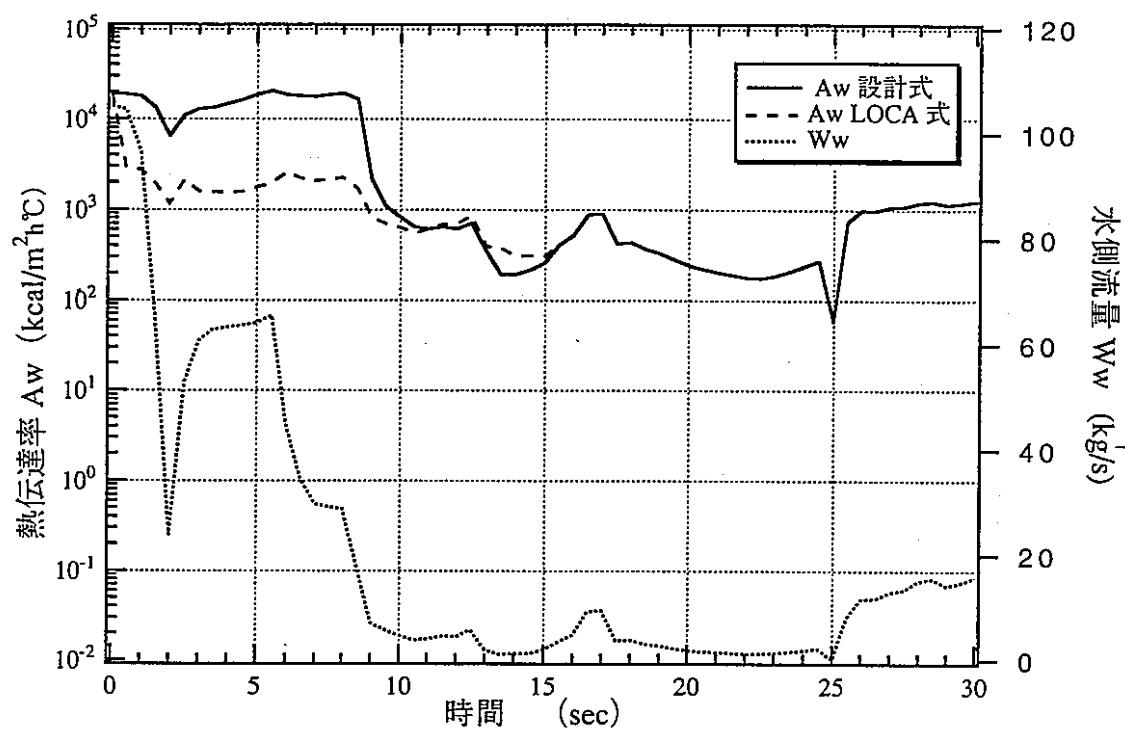


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

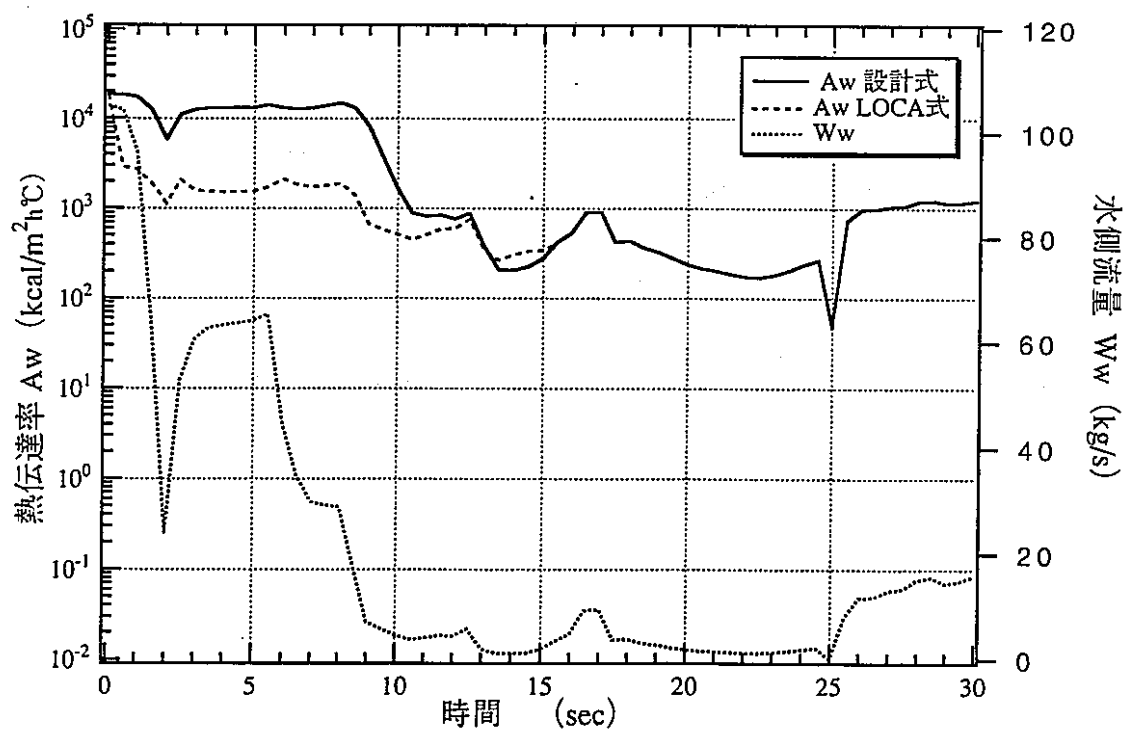


ケースII (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (メッシュ番号14)

図 - 伝熱管中心温度と水側温度 (EVリンク 9)

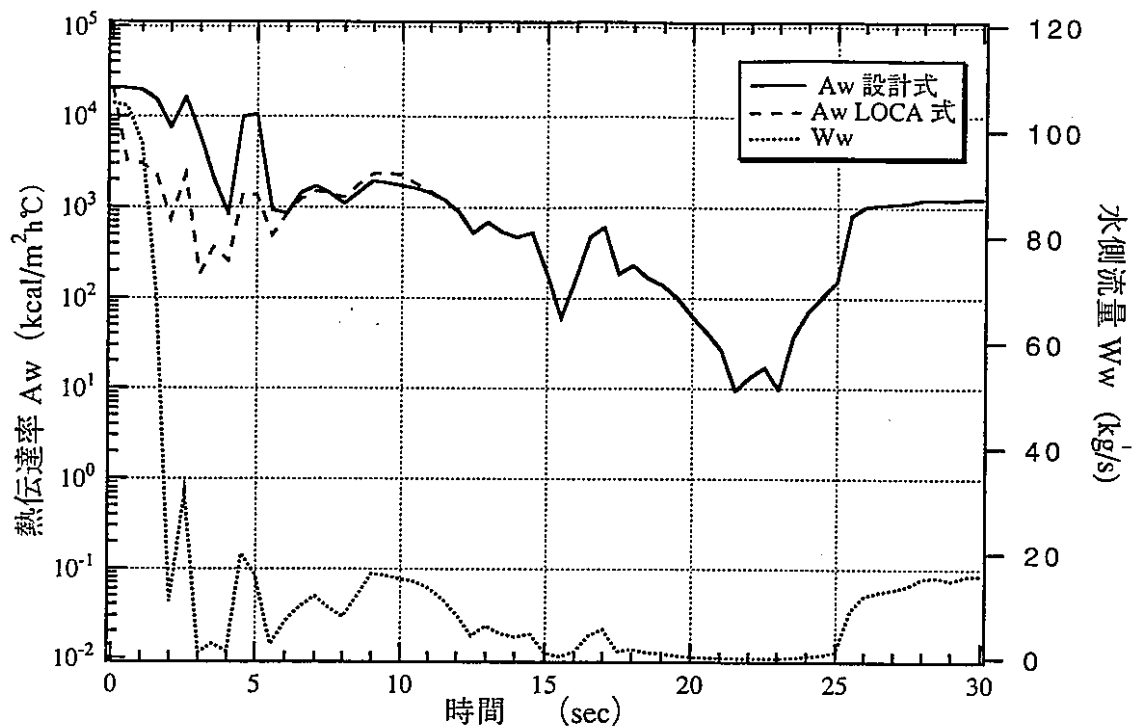


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

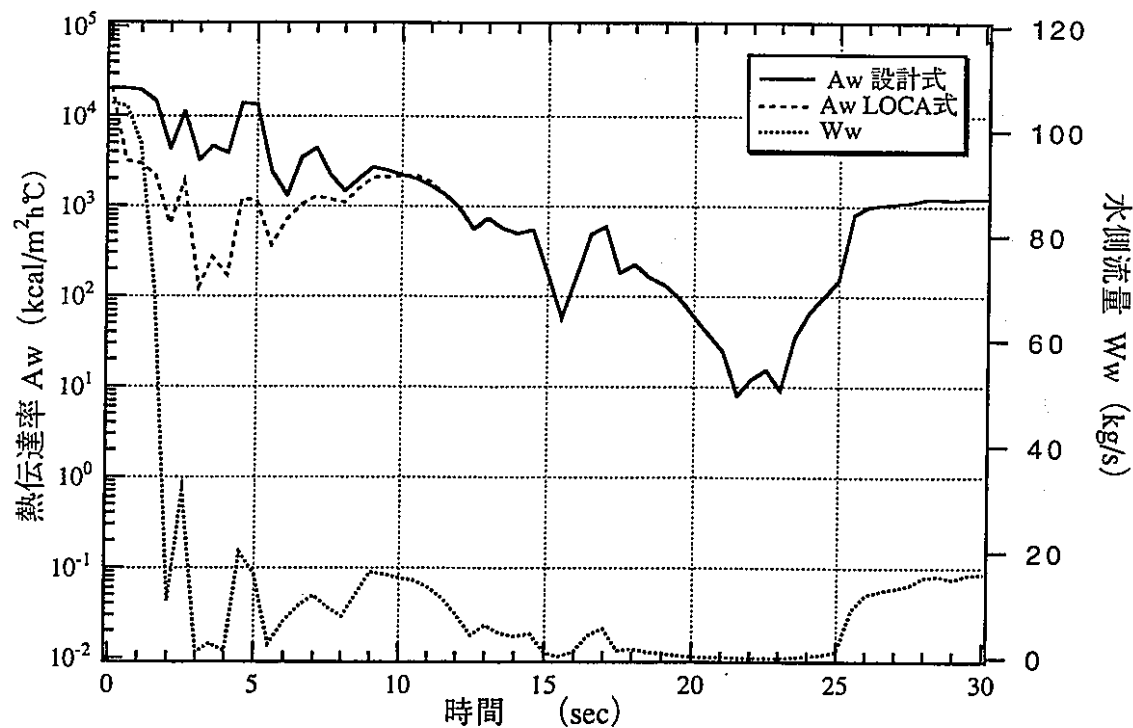


ケース1I (EV入口弁3B、EV出口弁4B) (メッシュ番号14)

図 - 水側熱伝達率と流量 (EVリンク6)

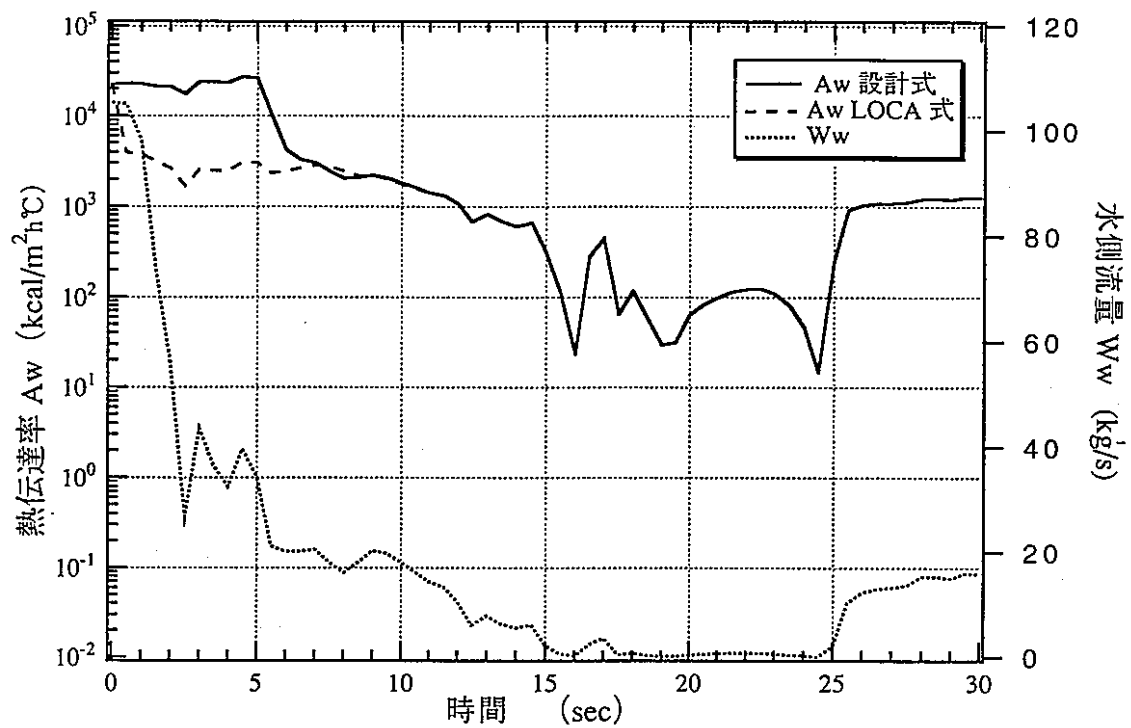


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

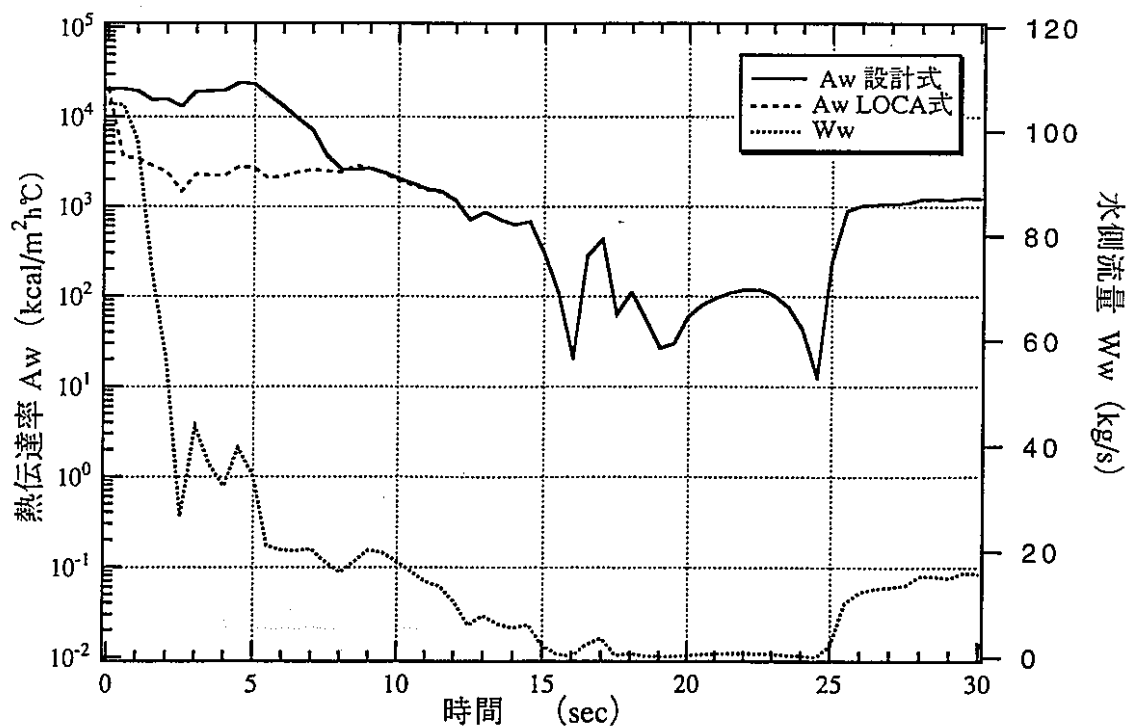


ケース1I (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (メッシュ番号14)

図 - 水側熱伝達率と流量 (EVリンク8)

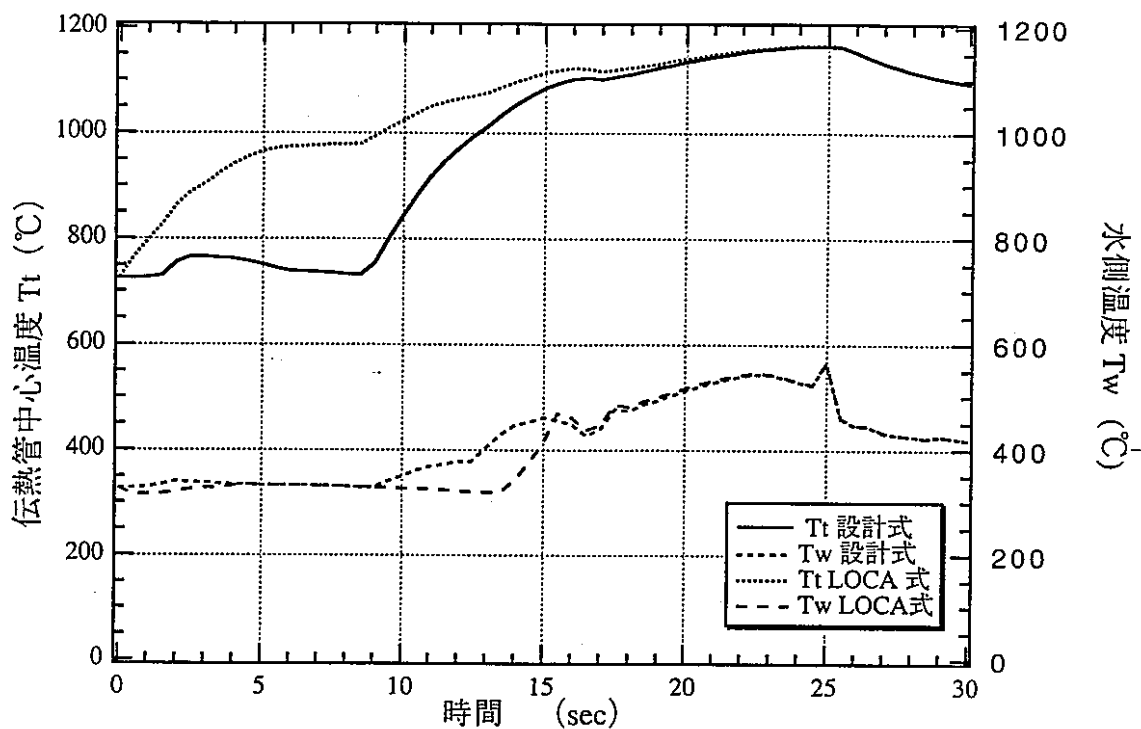


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

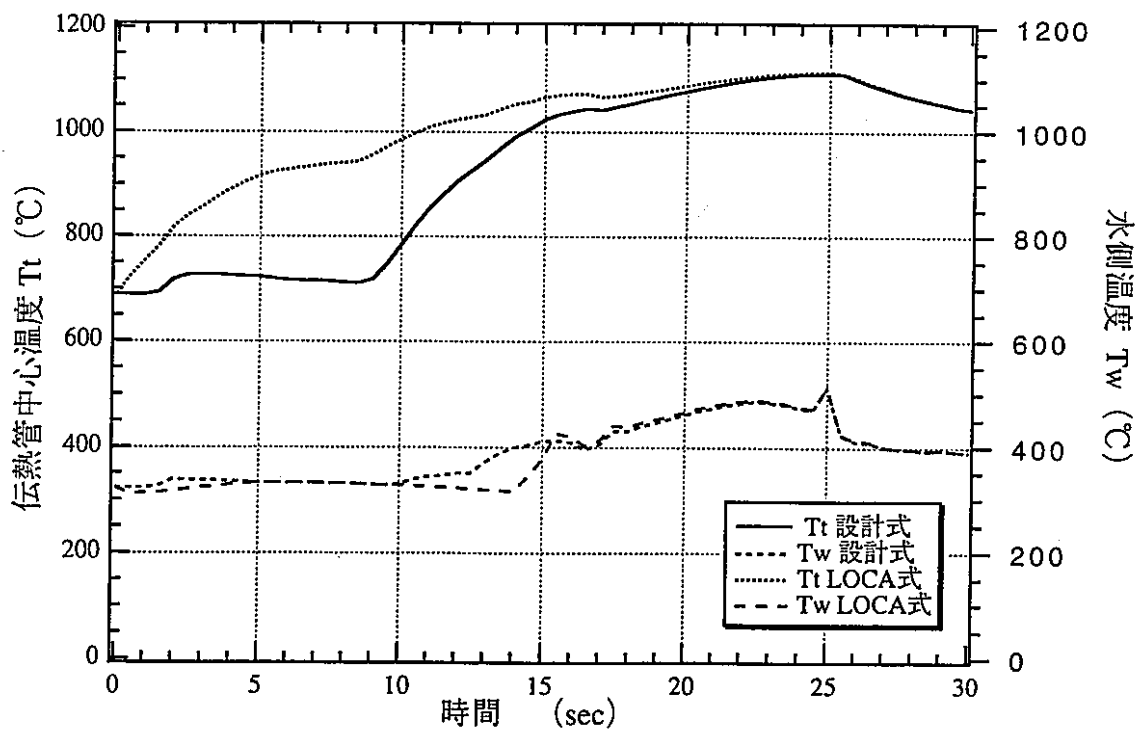


ケース1I (EV入口弁3B、EV出口弁4B) (メッシュ番号14)

図 - 水側熱伝達率と流量 (EVリンク9)

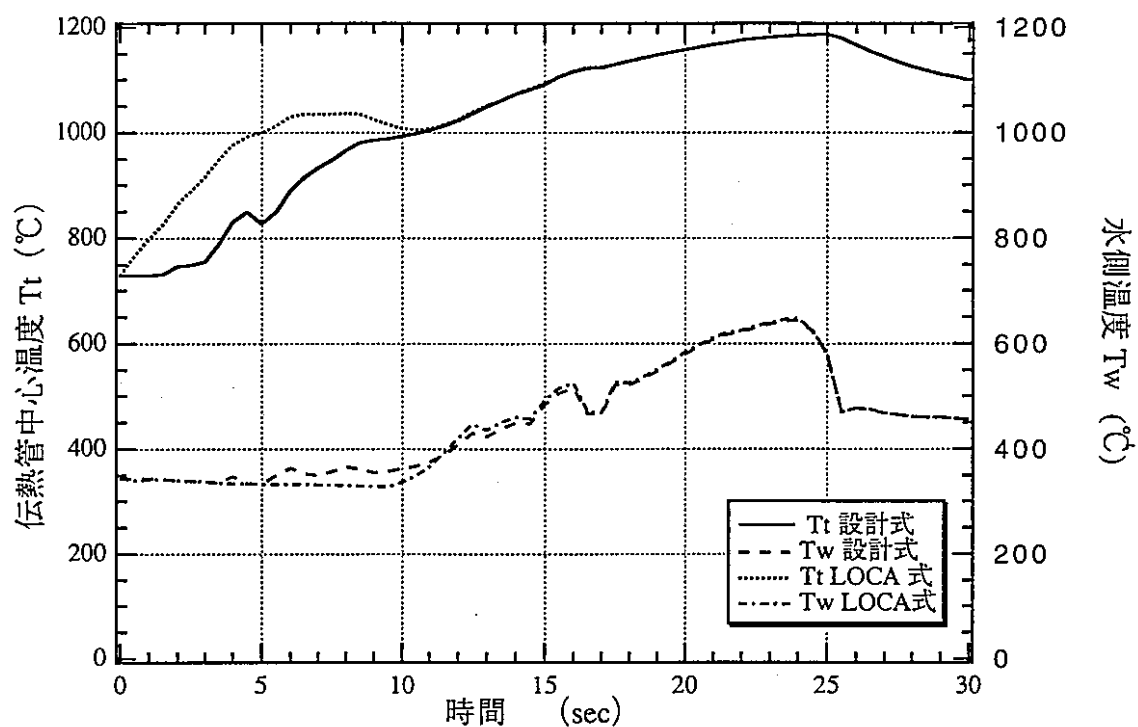


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

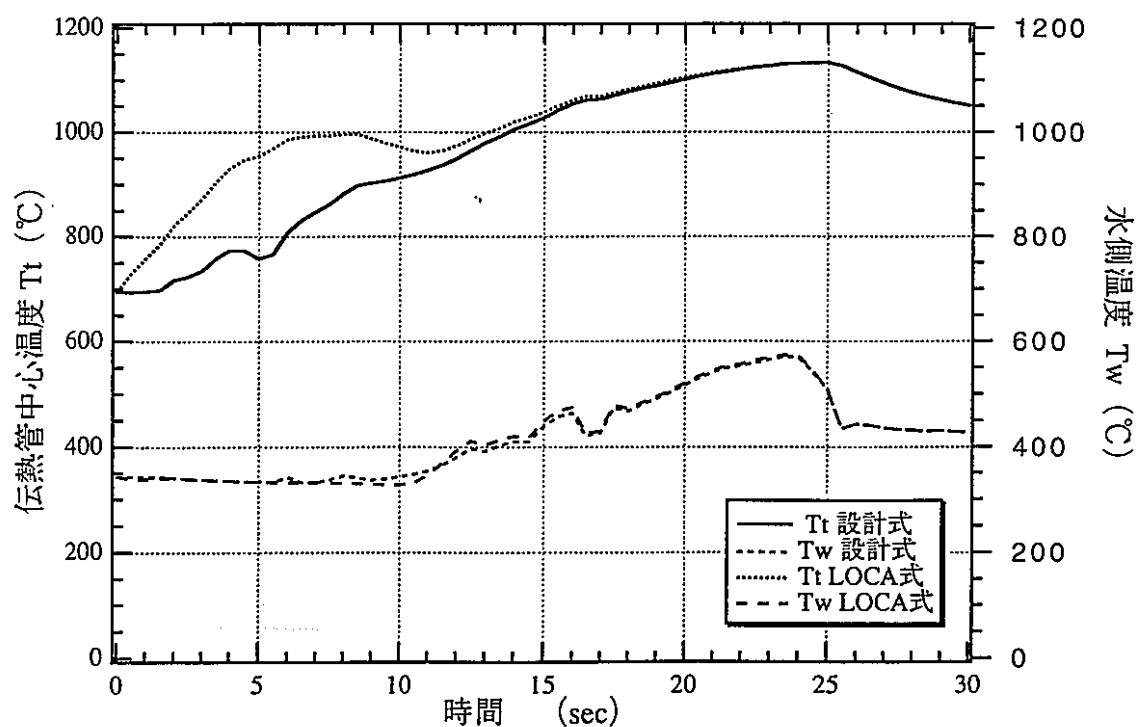


ケース1I (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (メッシュ番号16)

図 - 伝熱管中心温度と水側温度 (EVリンク 6)

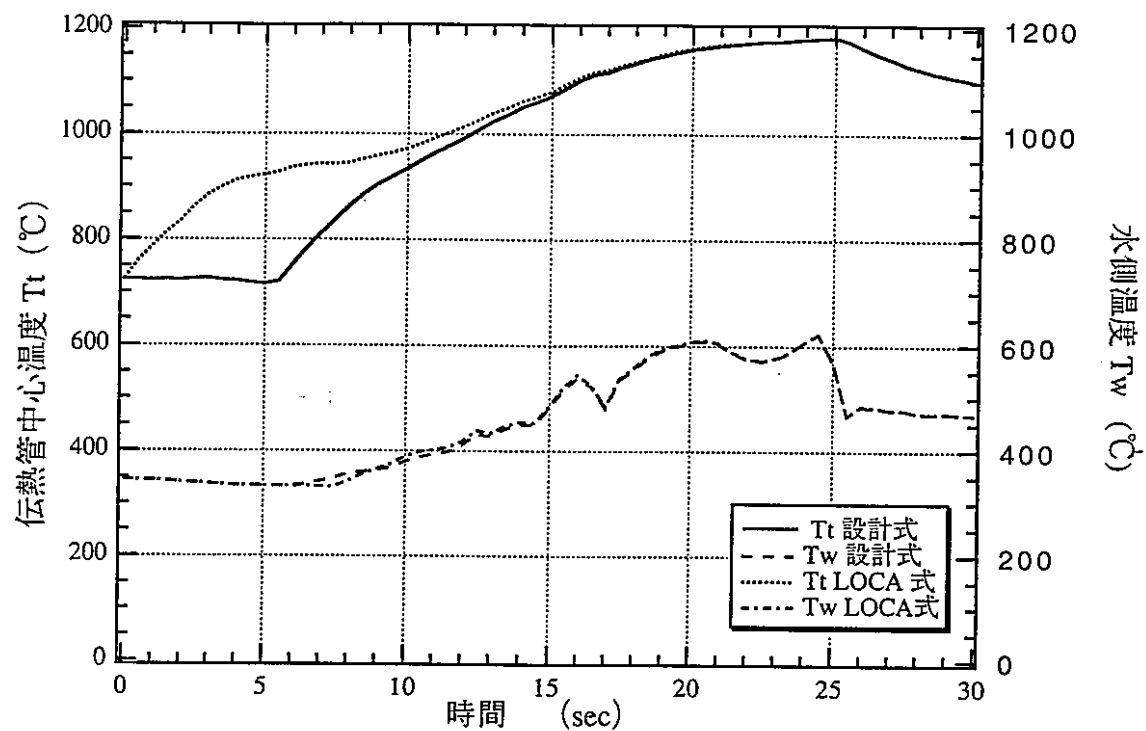


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

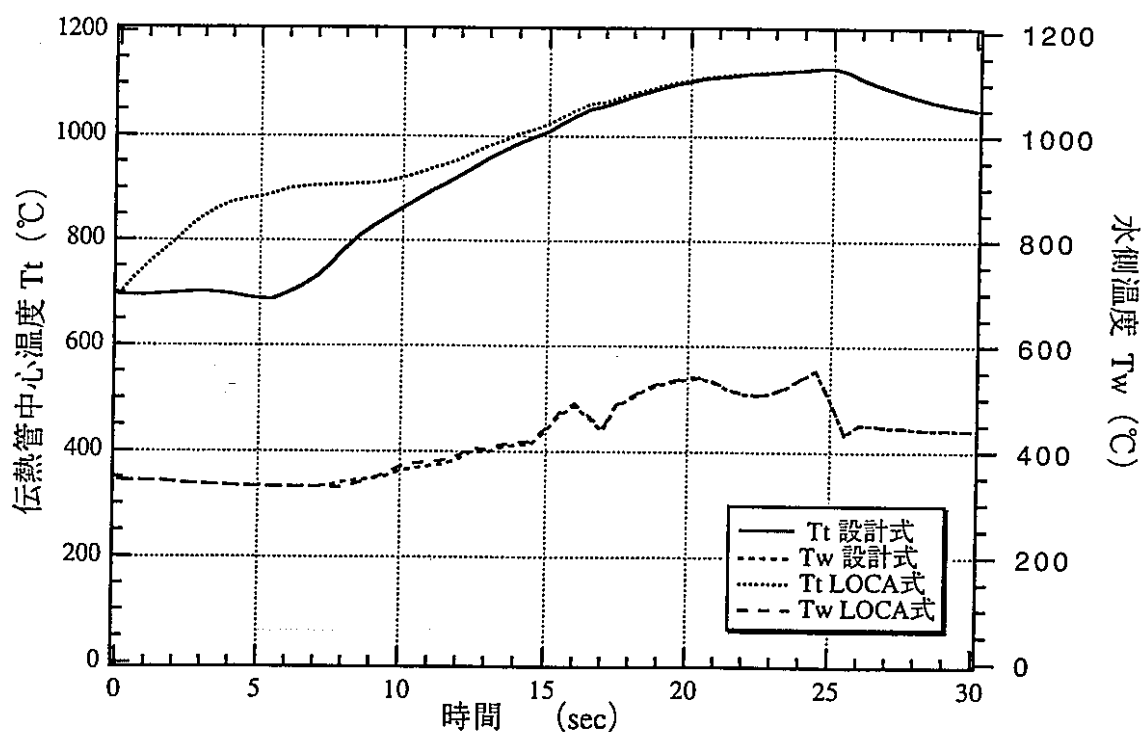


ケース1I (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (メッシュ番号16)

図 - 伝熱管中心温度と水側温度 (EVリンク 8)



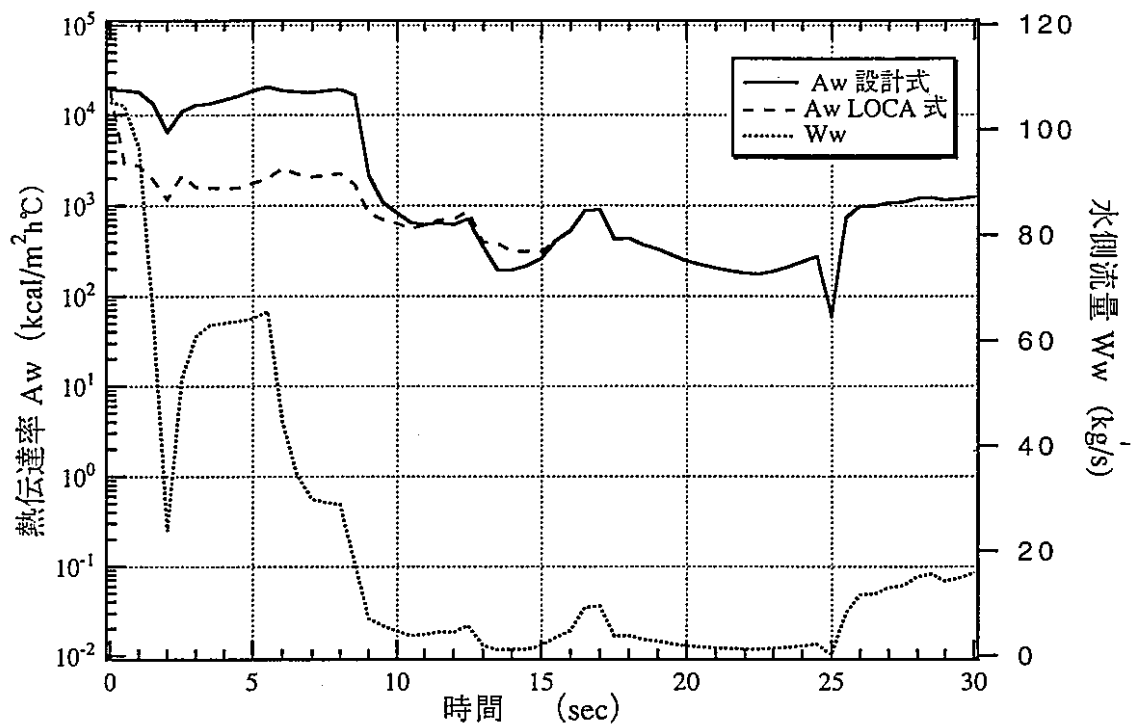
ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)



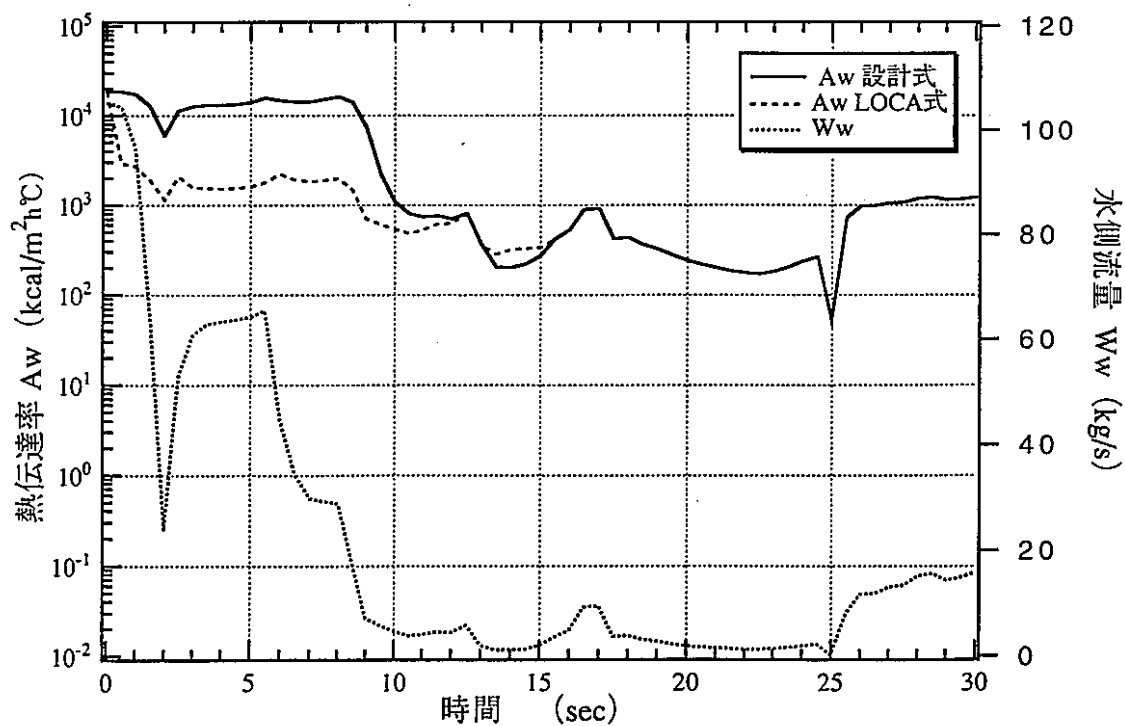
ケース1I (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (メッシュ番号16)

図 - 伝熱管中心温度と水側温度 (EVリンク 9)



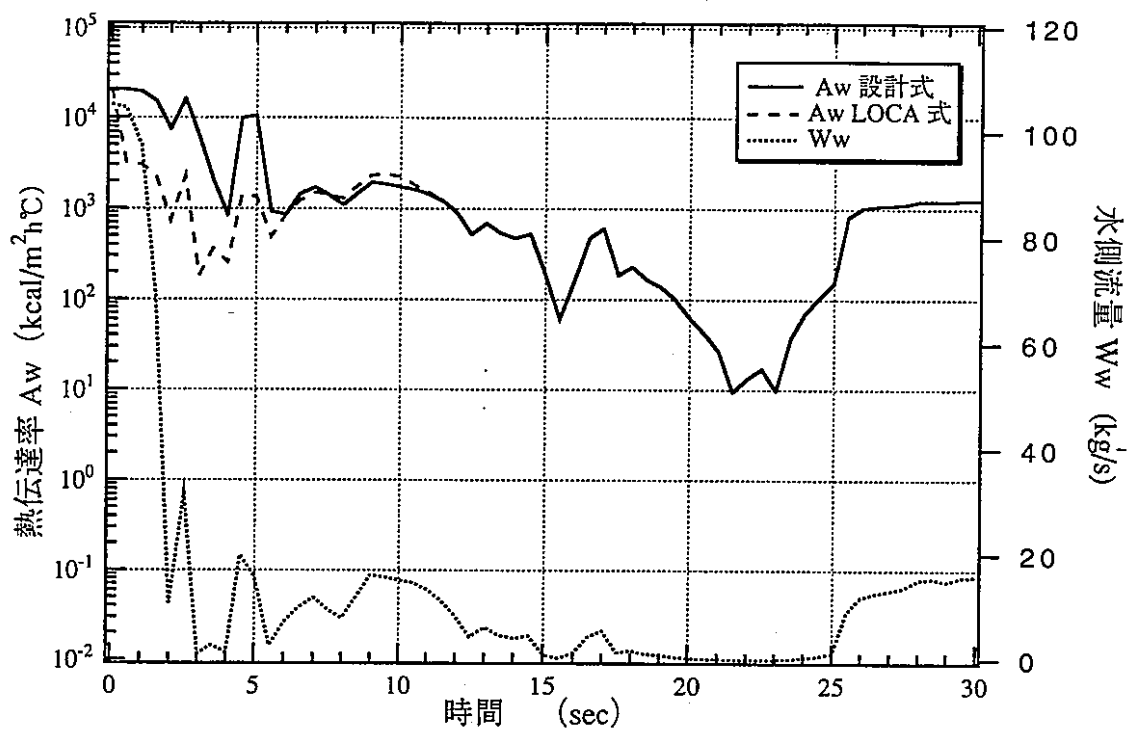


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

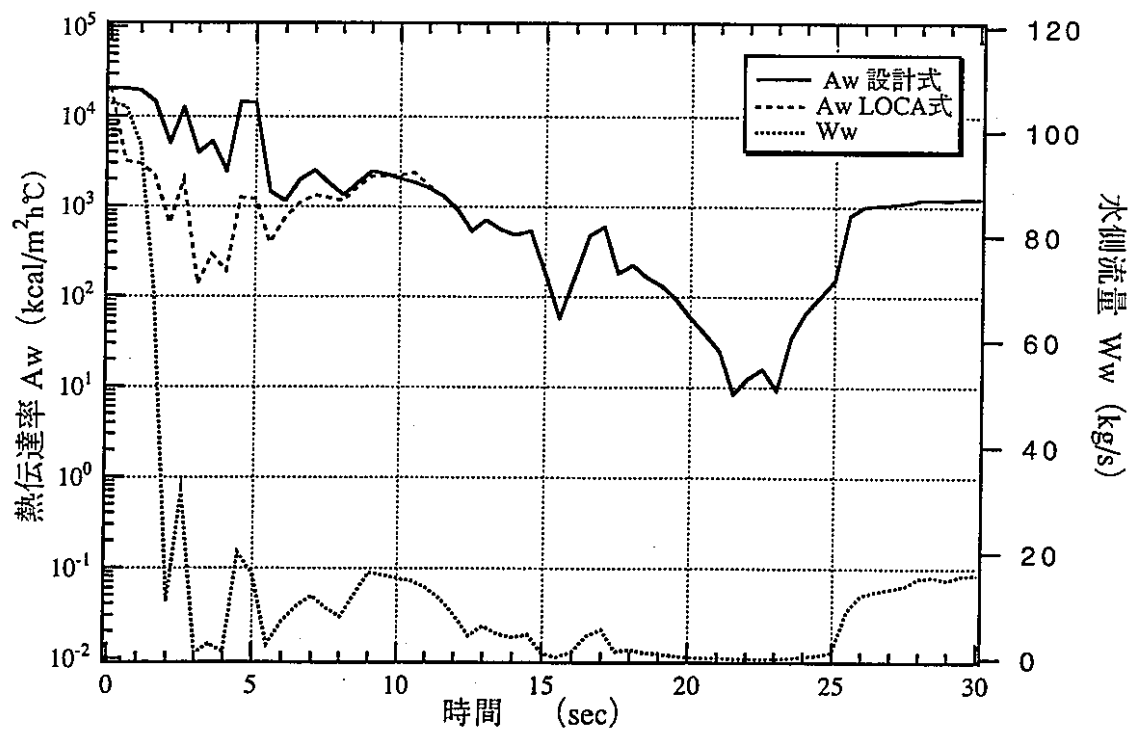


ケース1I (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (メッシュ番号16)

図 - 水側熱伝達率と流量 (EVリンク6)

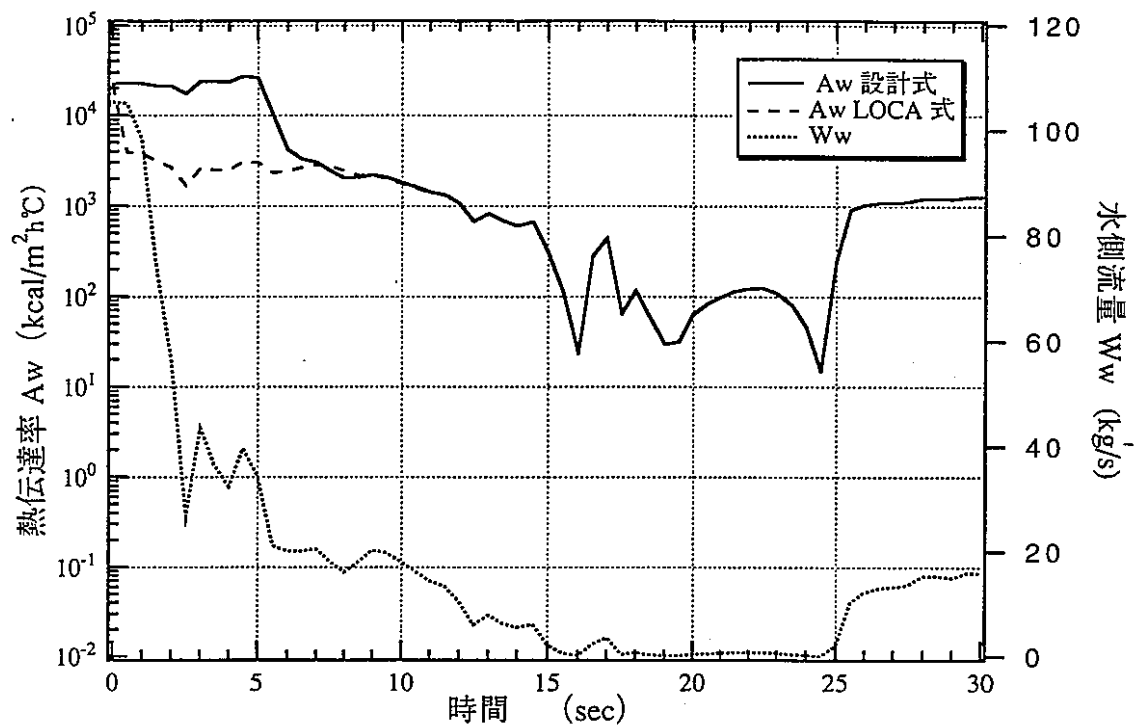


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

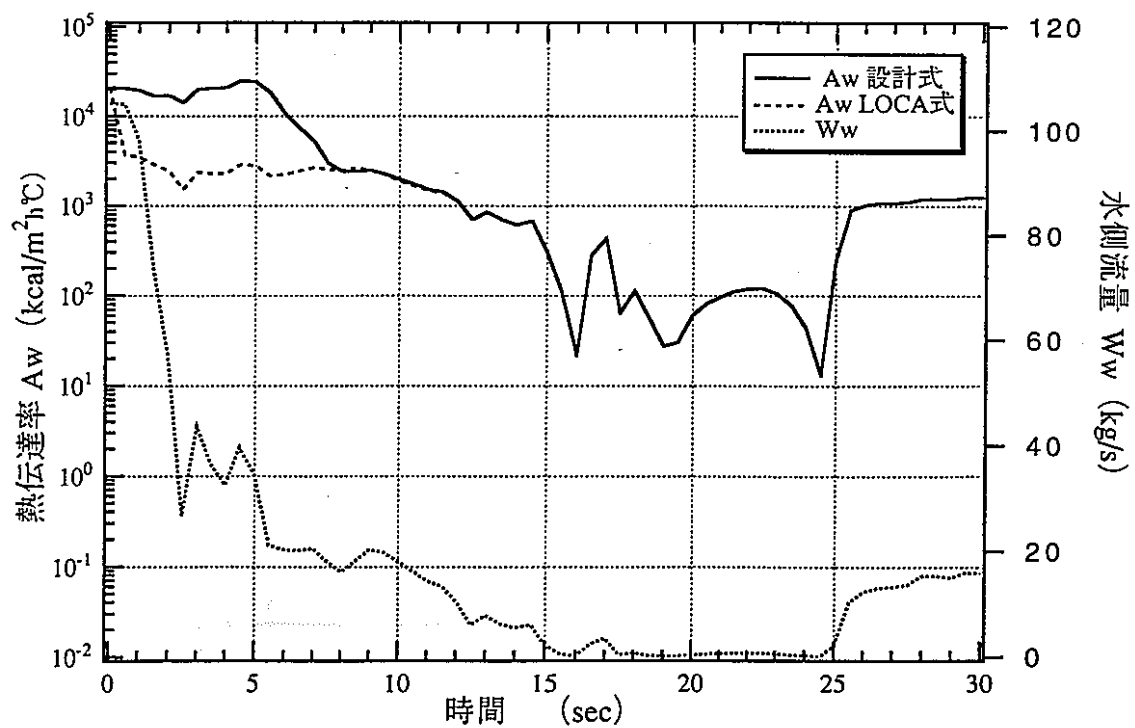


ケース1I (EV入口弁3B、EV出口弁4B) (メッシュ番号16)

図 - 水側熱伝達率と流量 (EVリンク8)

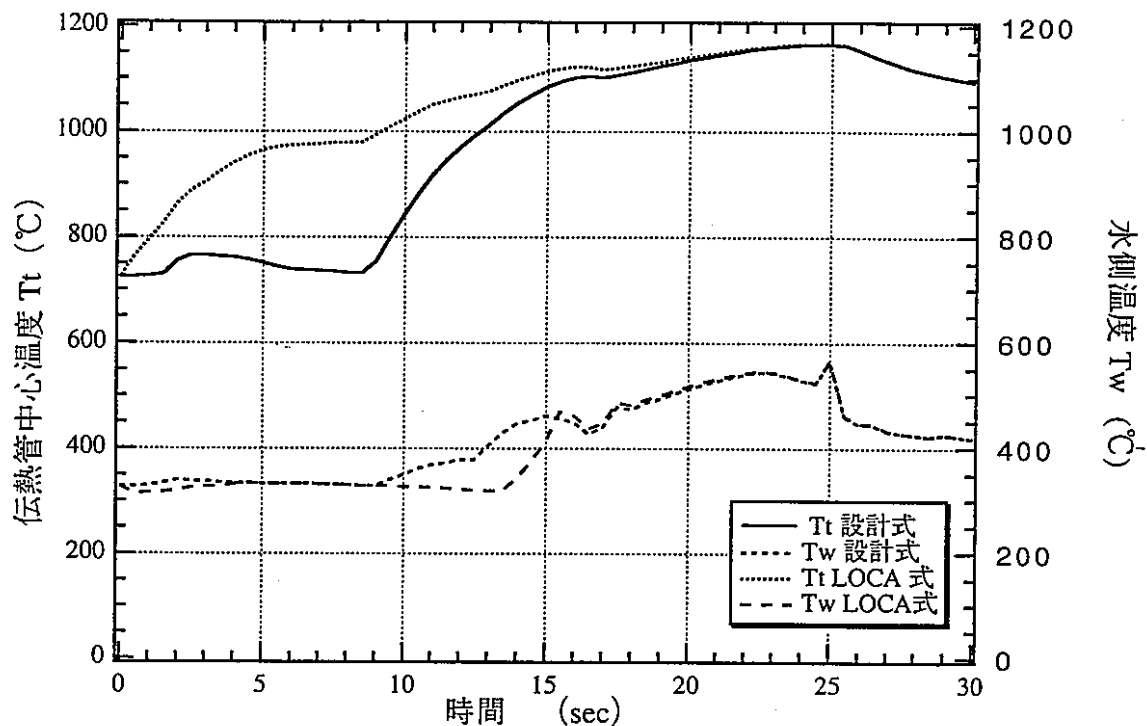


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

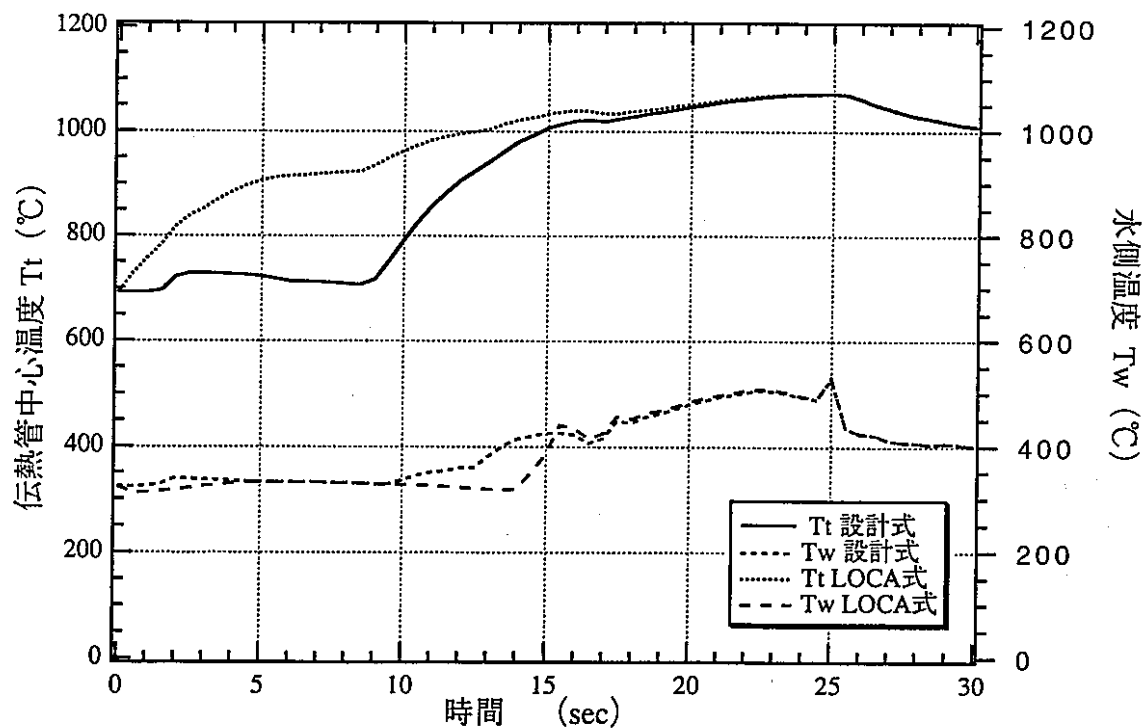


ケース1I (EV入口弁3B、EV出口弁4B) (メッシュ番号16)

図 - 水側熱伝達率と流量 (EVリンク9)

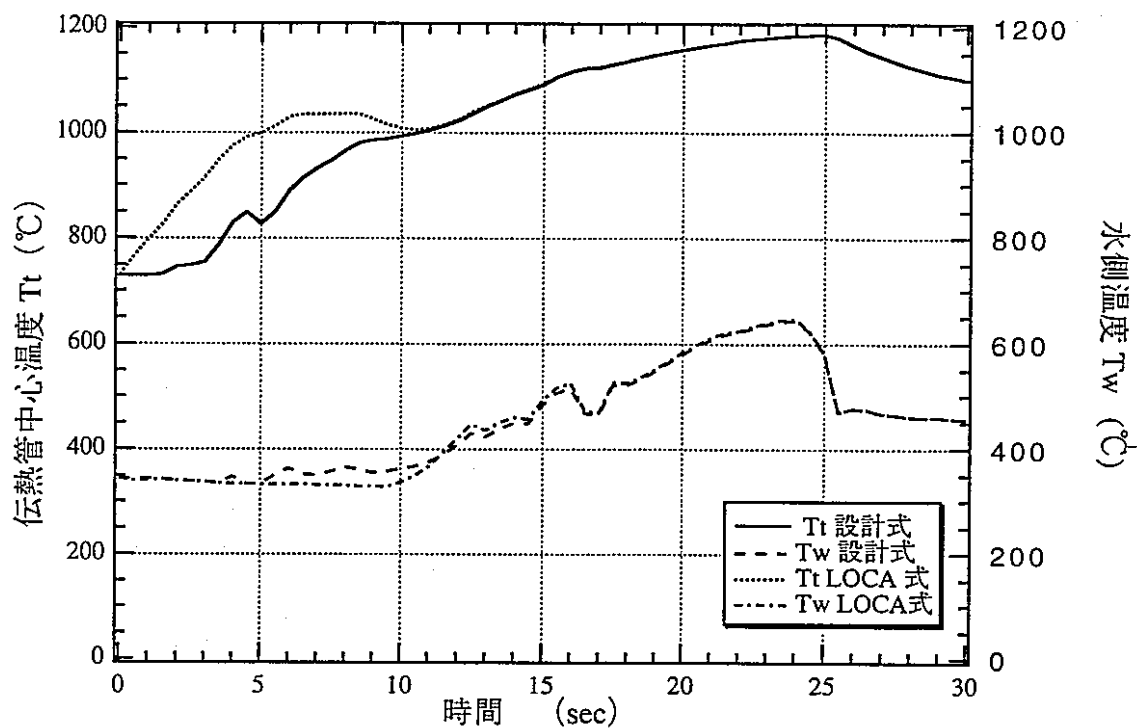


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

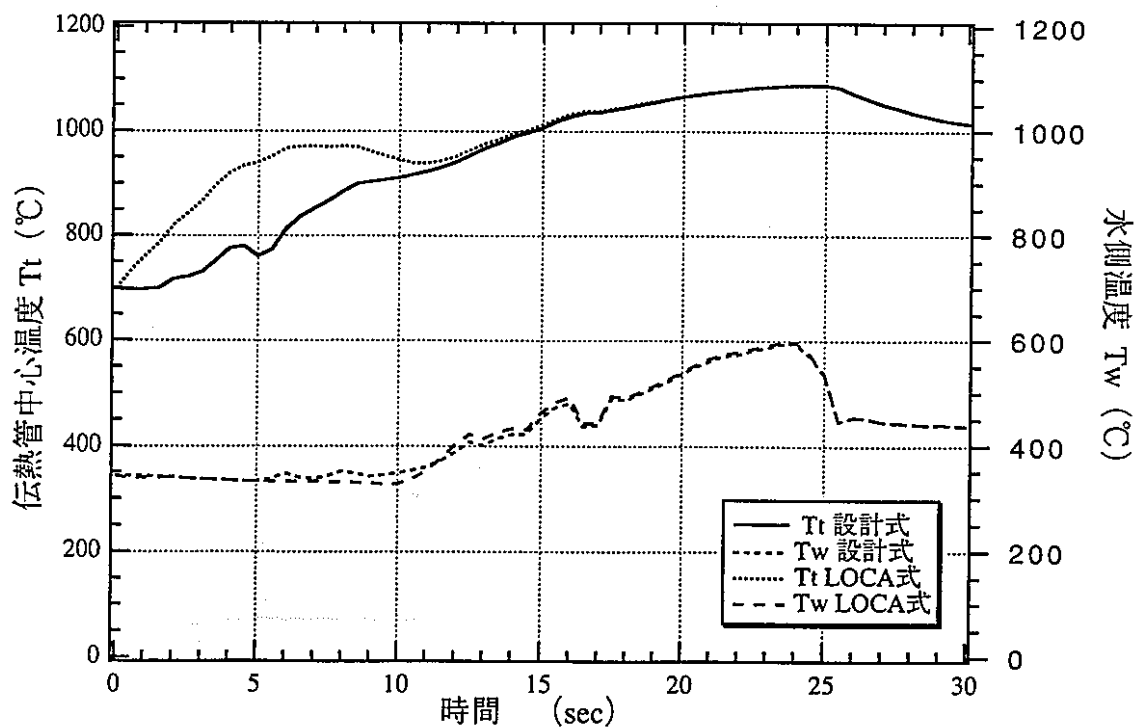


ケース1I (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (メッシュ番号18)

図 - 伝熱管中心温度と水側温度 (EVリンク 6)

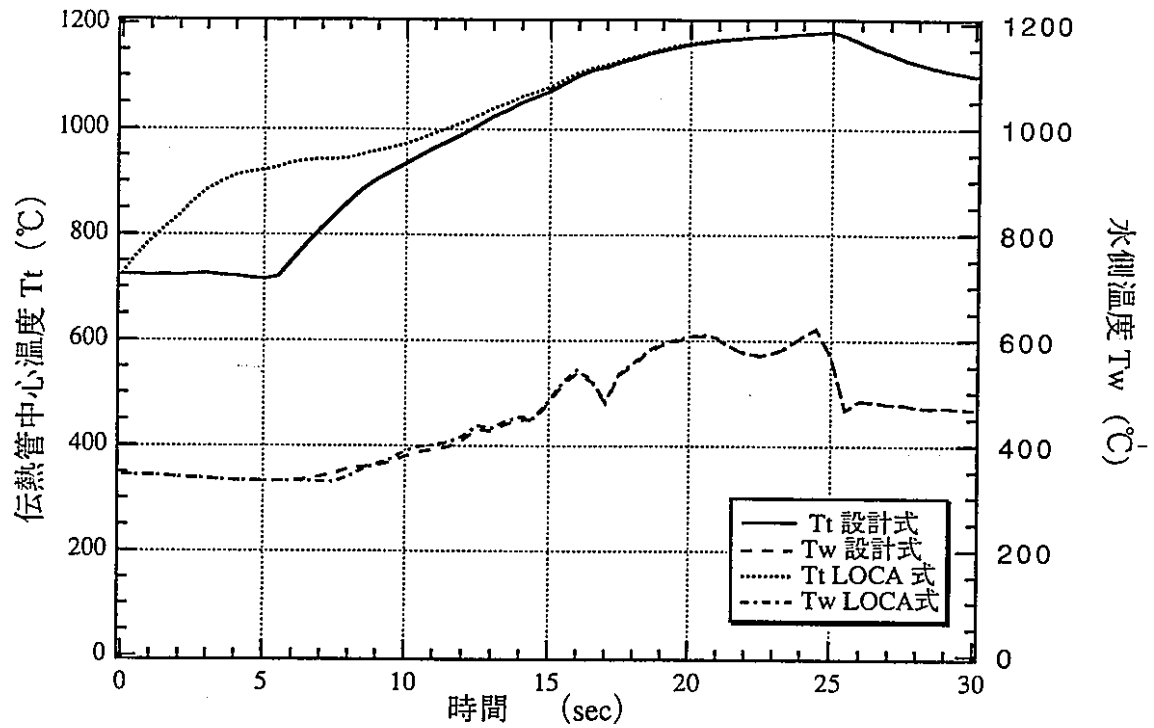


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

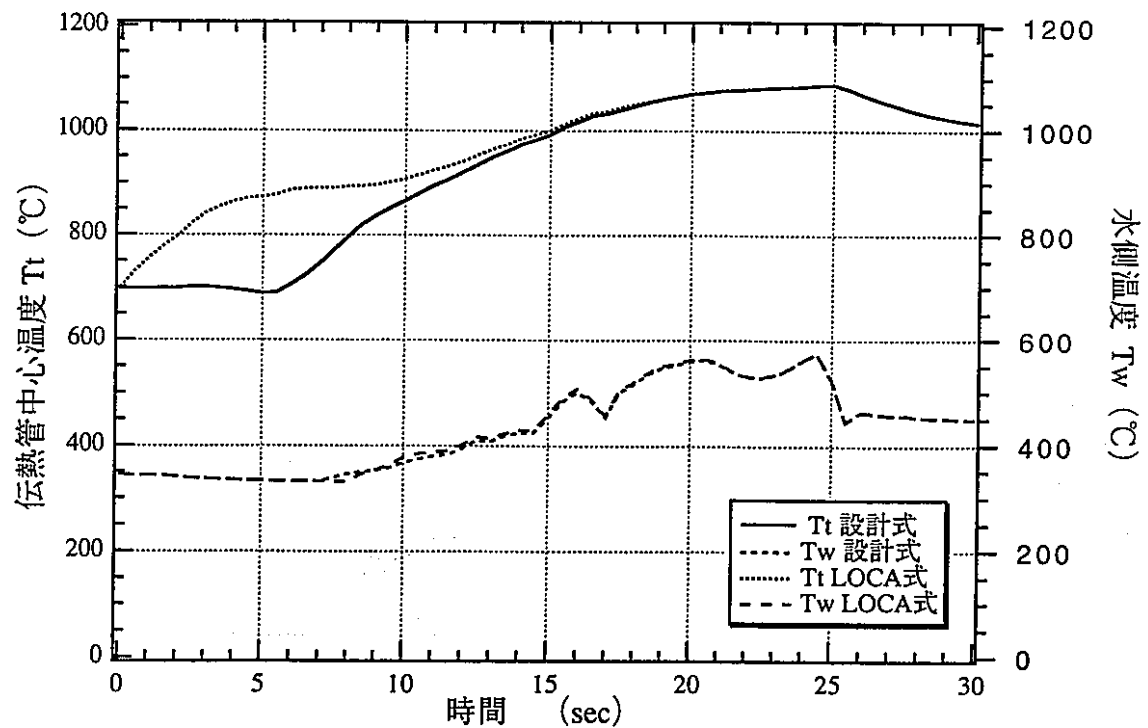


ケースII (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (メッシュ番号18)

図 - 伝熱管中心温度と水側温度 (EVリンク 8)

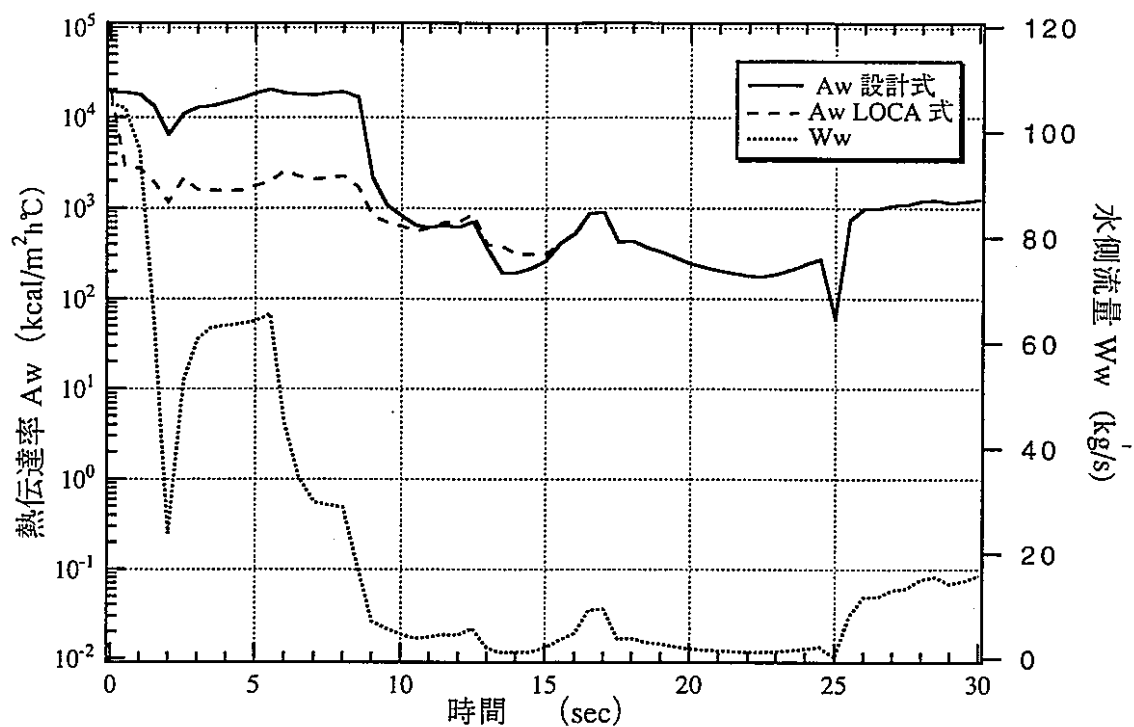


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

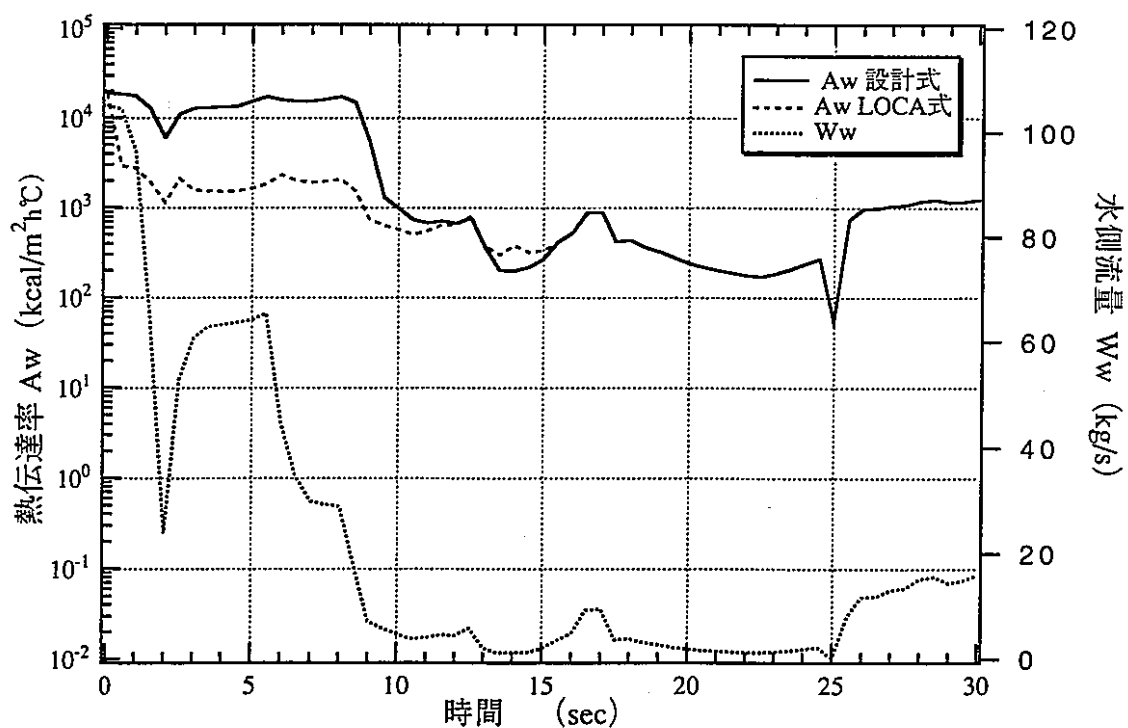


ケース1I (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (メッシュ番号18)

図 - 伝熱管中心温度と水側温度 (EVリンク 9)

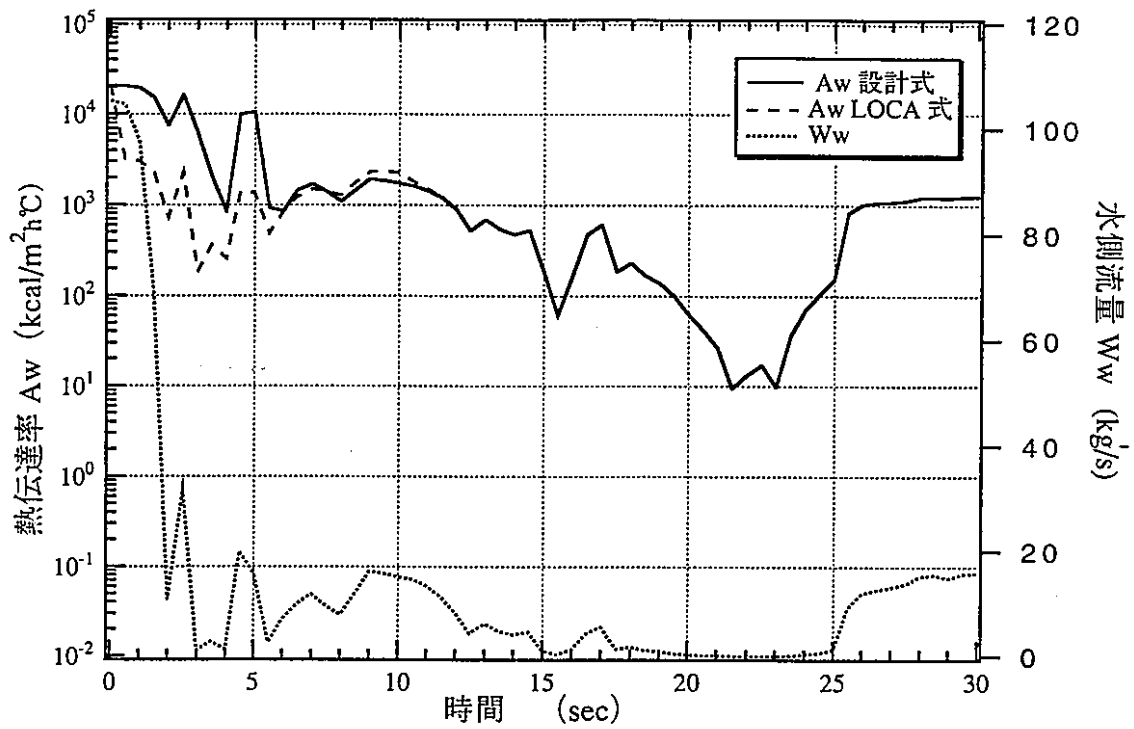


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

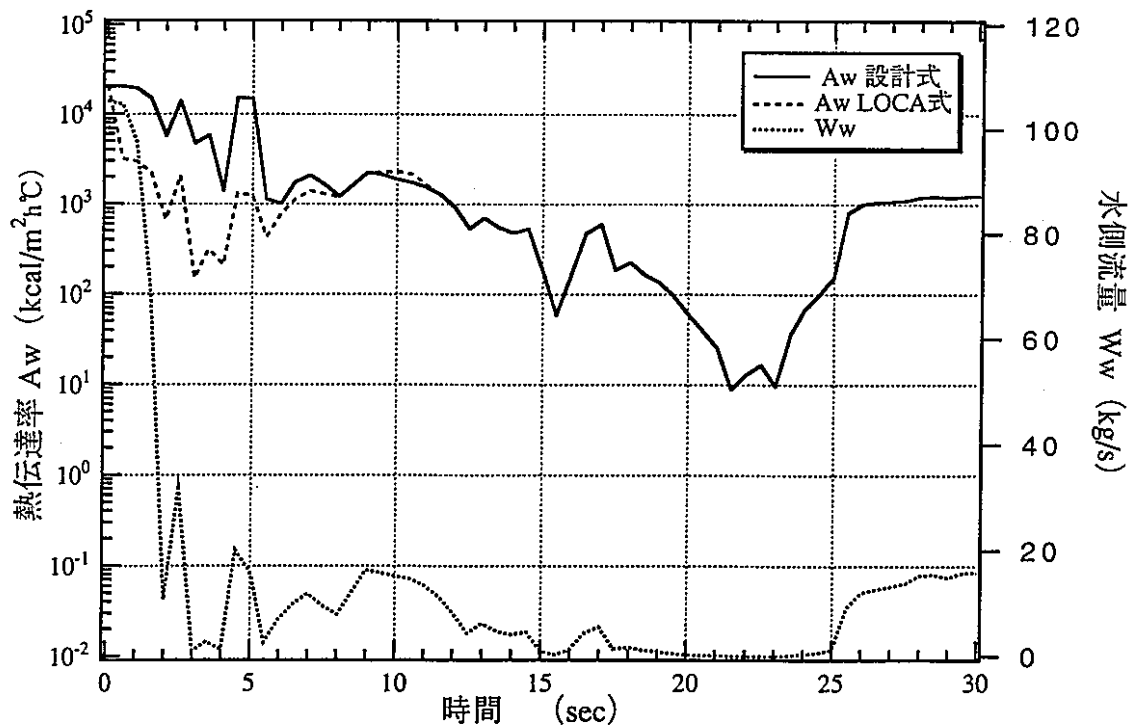


ケースII (EV入口弁3B、EV出口弁4B) (メッシュ番号18)

図 - 水側熱伝達率と流量 (EVリンク6)



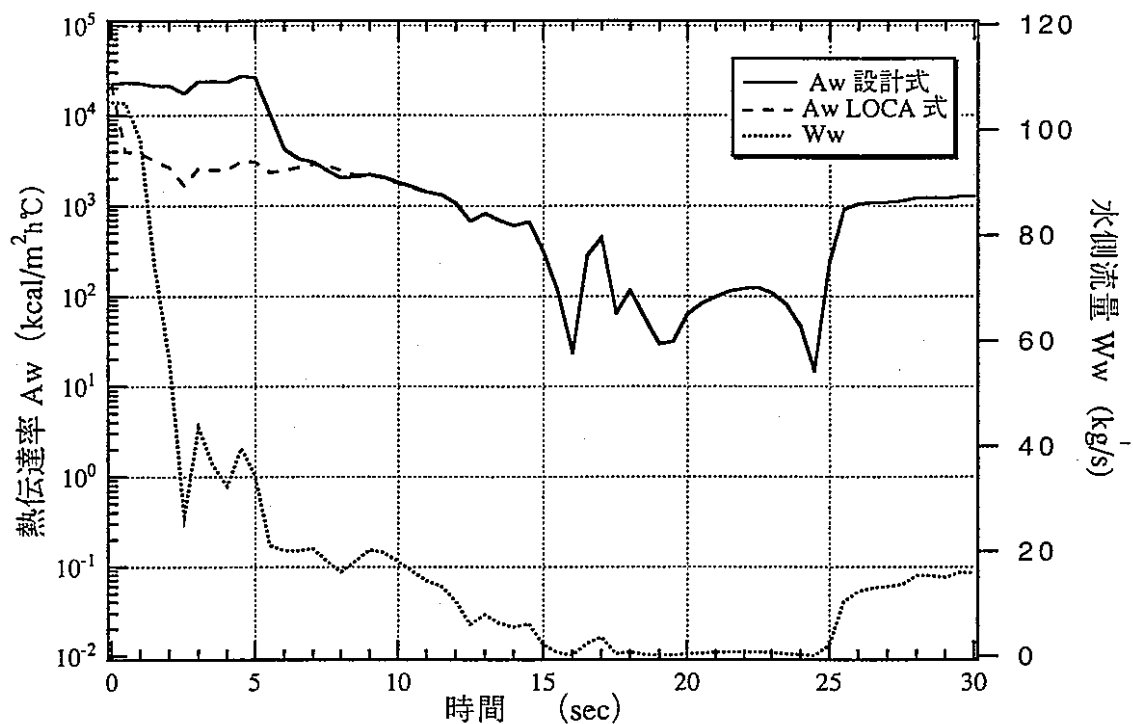
ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)



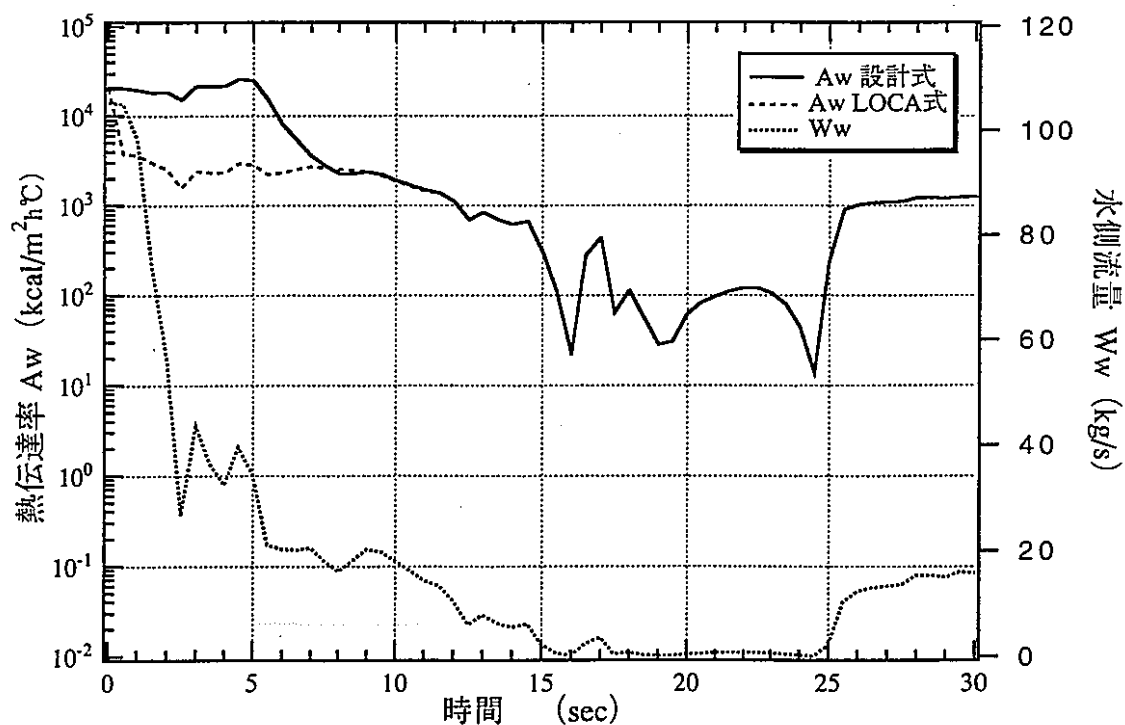
ケース1I (EV入口弁3B、EV出口弁4B) (メッシュ番号18)

図 - 水側熱伝達率と流量 (EVリンク8)



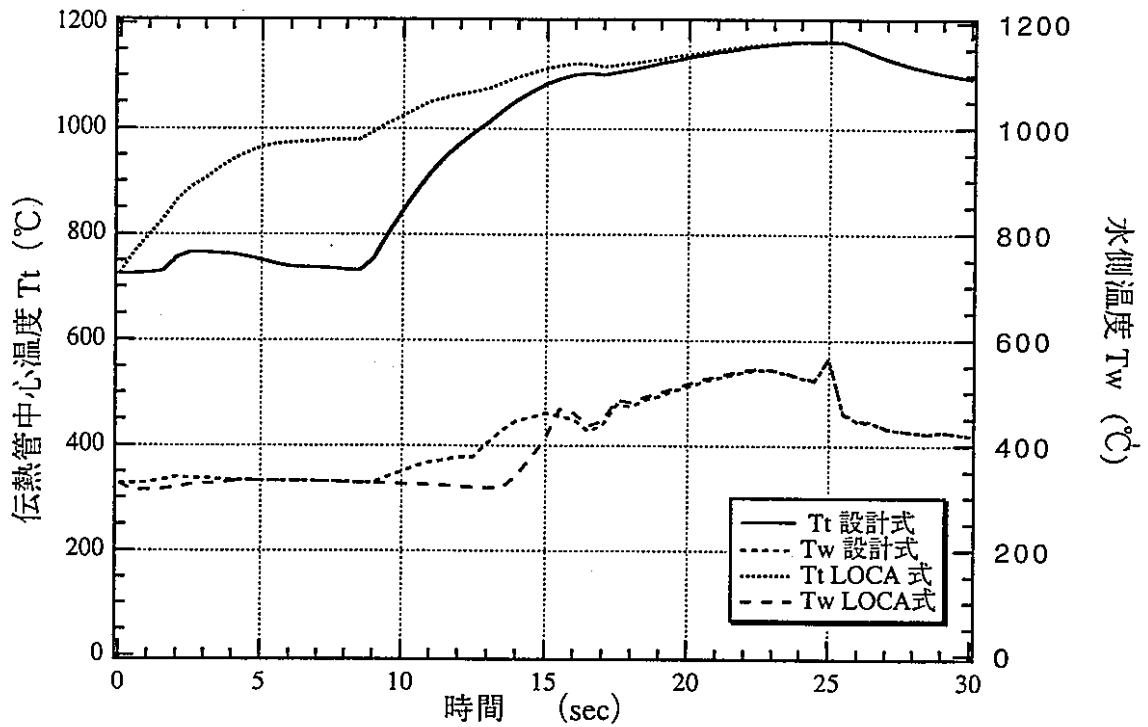


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

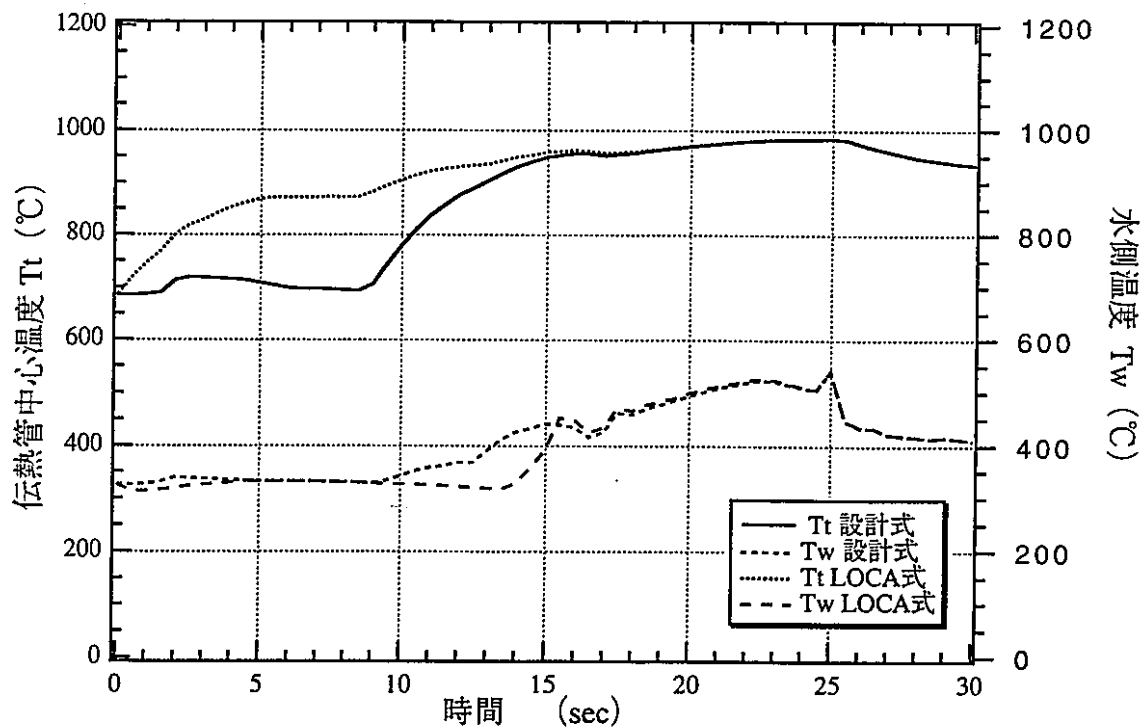


ケースII (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (メッシュ番号18)

図 - 水側熱伝達率と流量 (EVリンク 9)

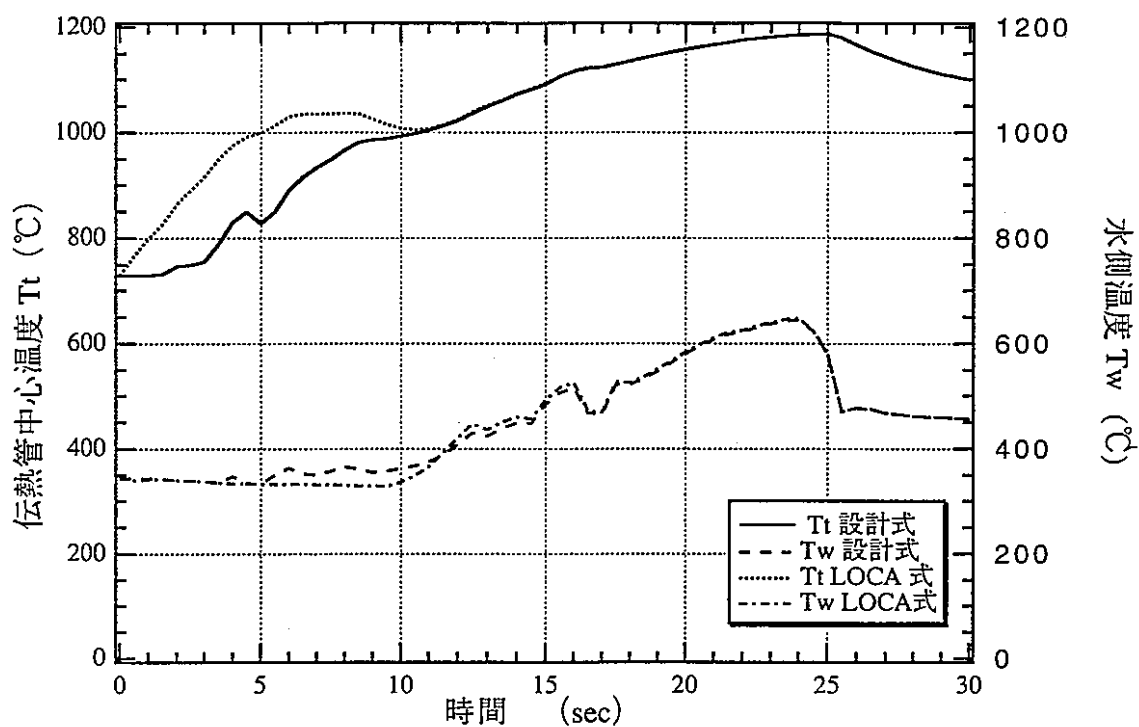


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

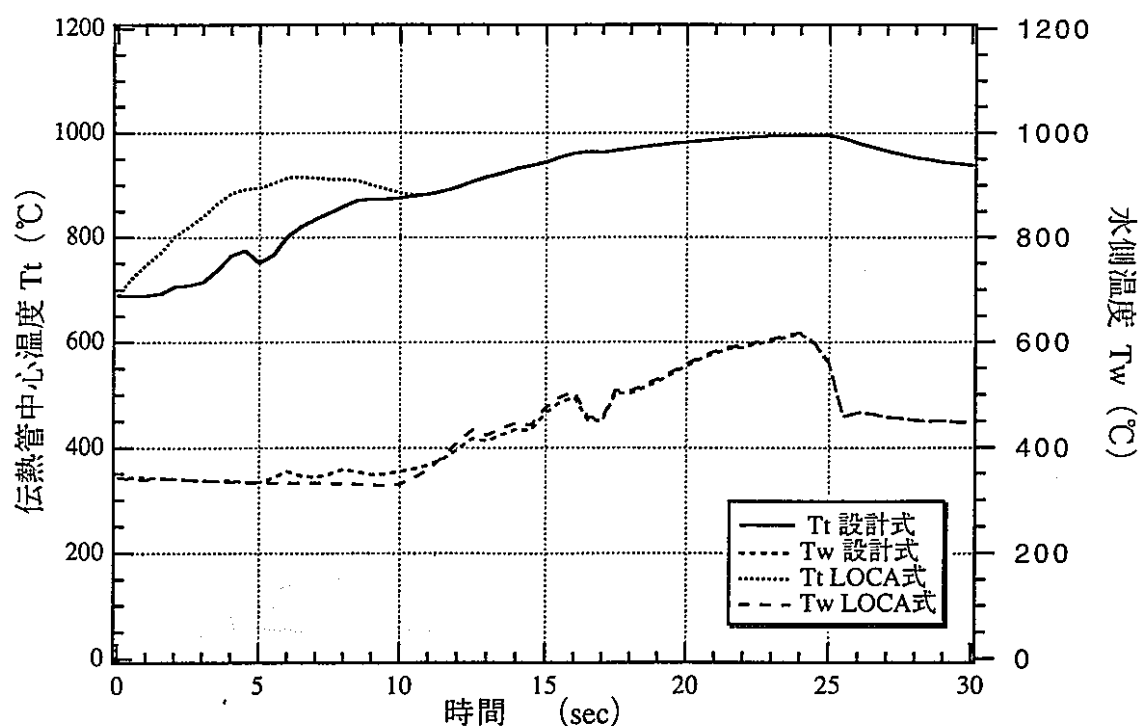


ケース1I (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (メッシュ番号20)

図 - 伝熱管中心温度と水側温度 (EVリンク 6)

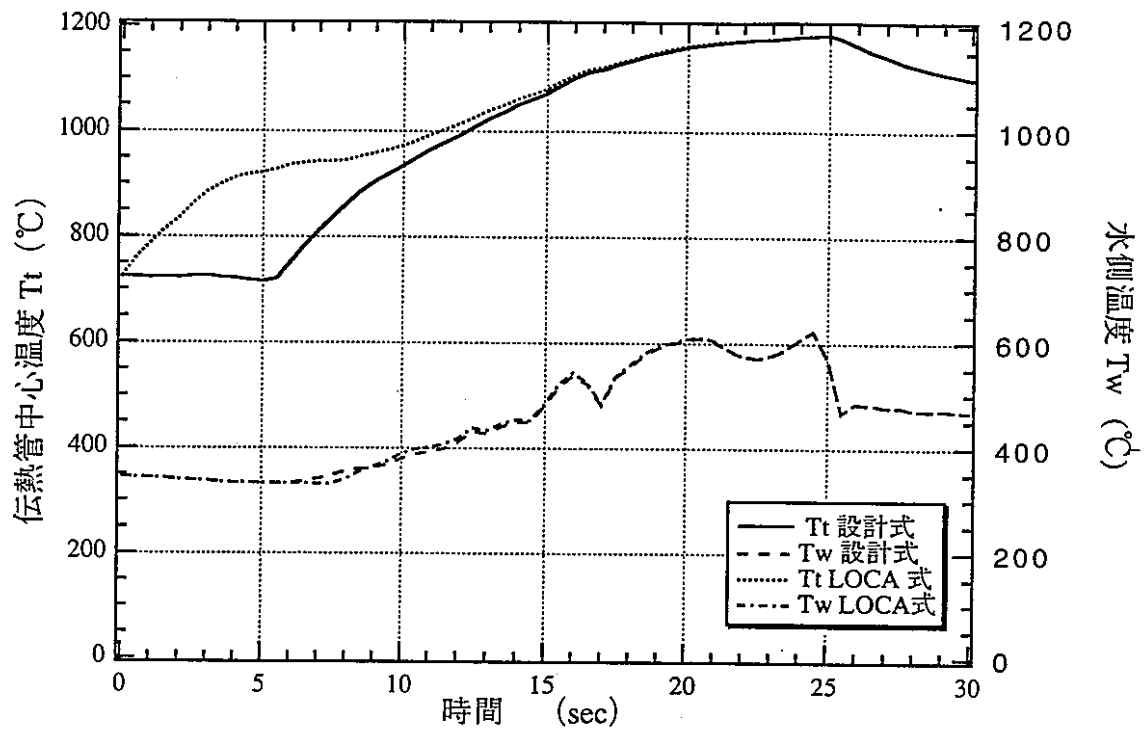


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

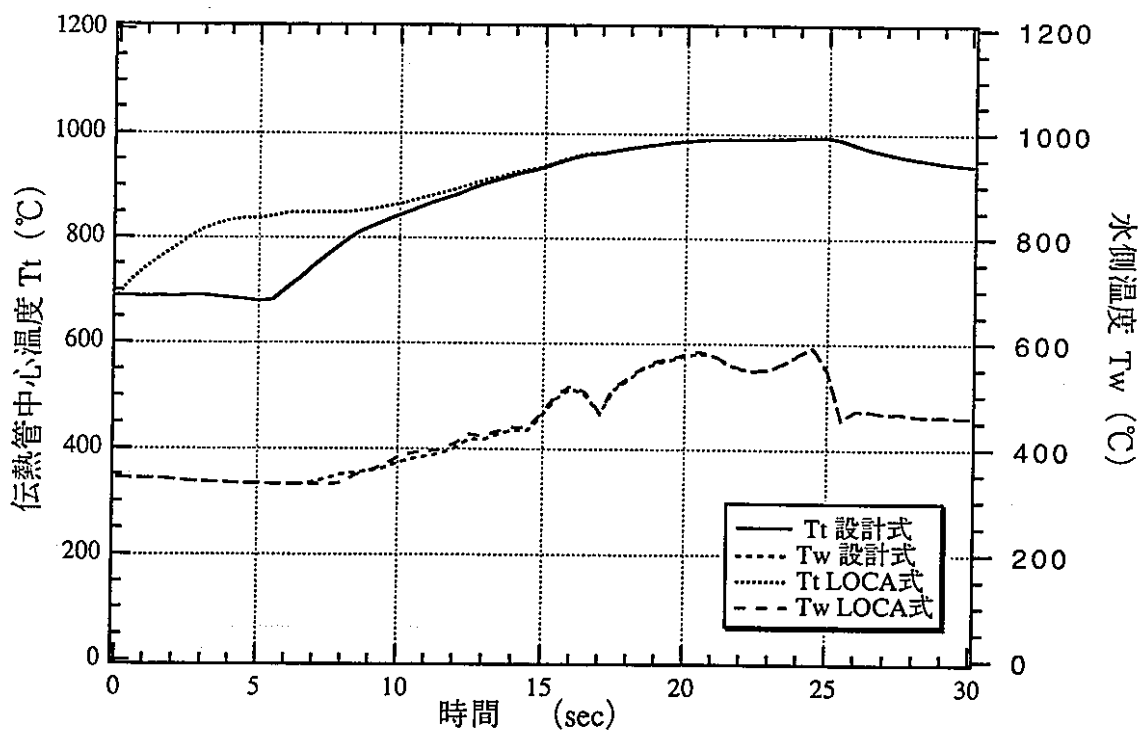


ケース1I (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (メッシュ番号20)

図 - 伝熱管中心温度と水側温度 (EVリンク 8)

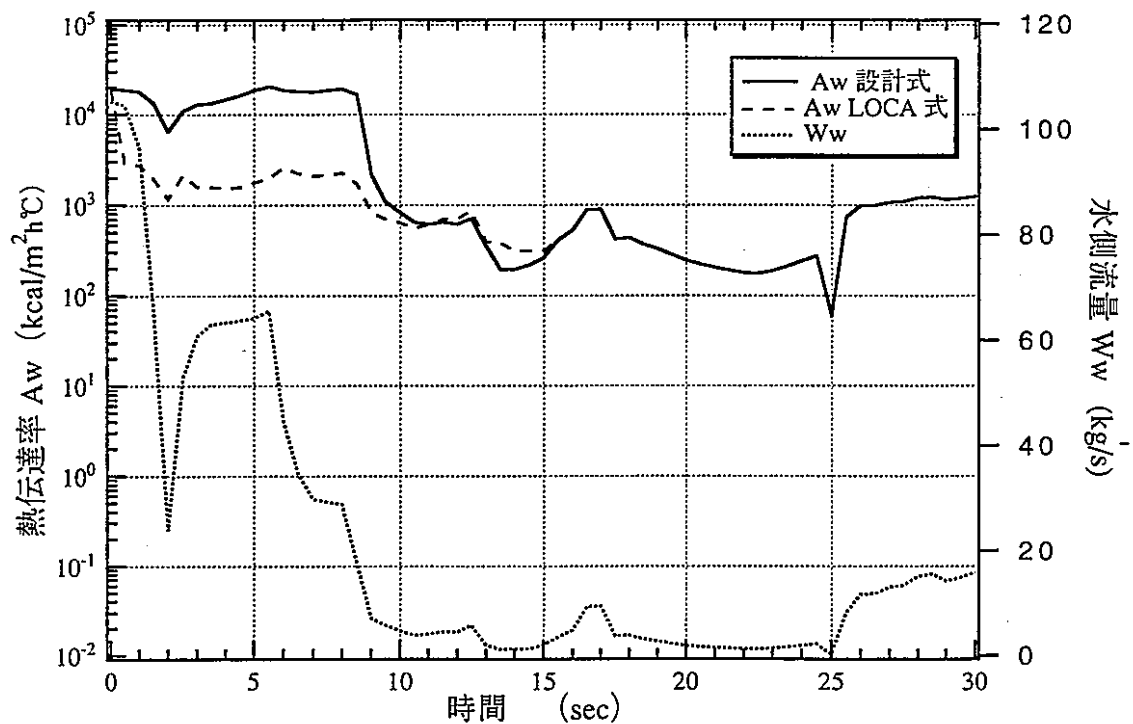


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

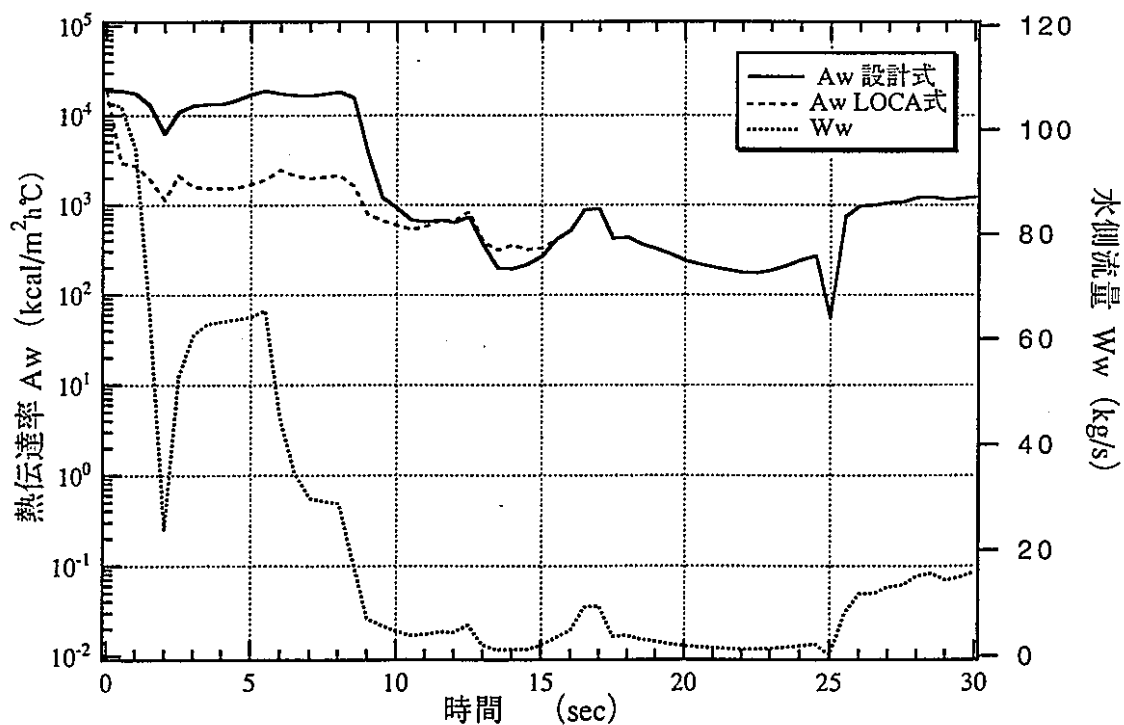


ケース1I (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (メッシュ番号20)

図 - 伝熱管中心温度と水側温度 (EVリンク 9)

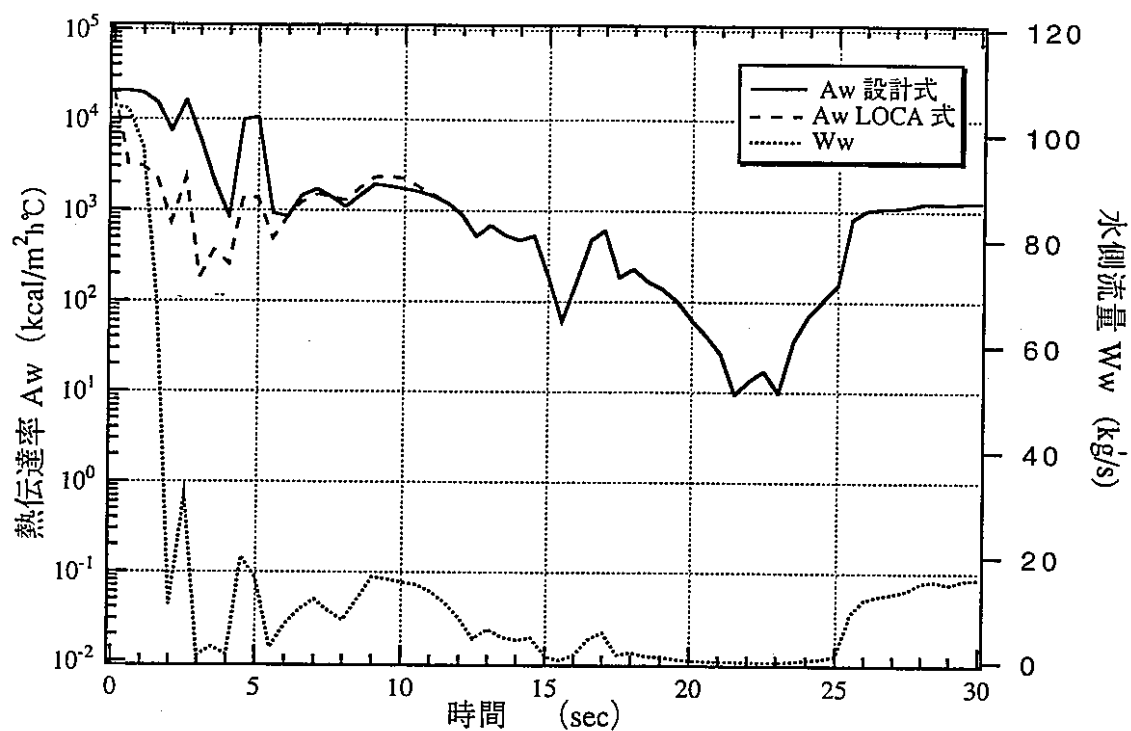


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

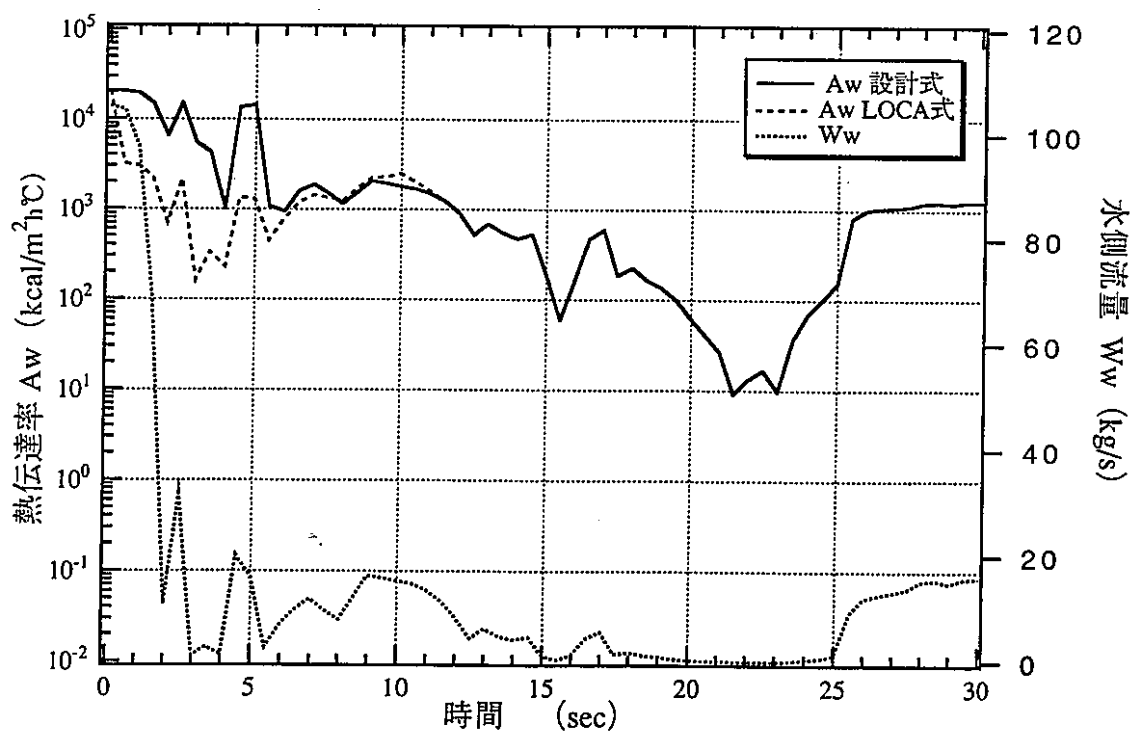


ケース1I (EV入口弁3B、EV出口弁4B) (メッシュ番号20)

図 - 水側熱伝達率と流量 (EVリンク6)

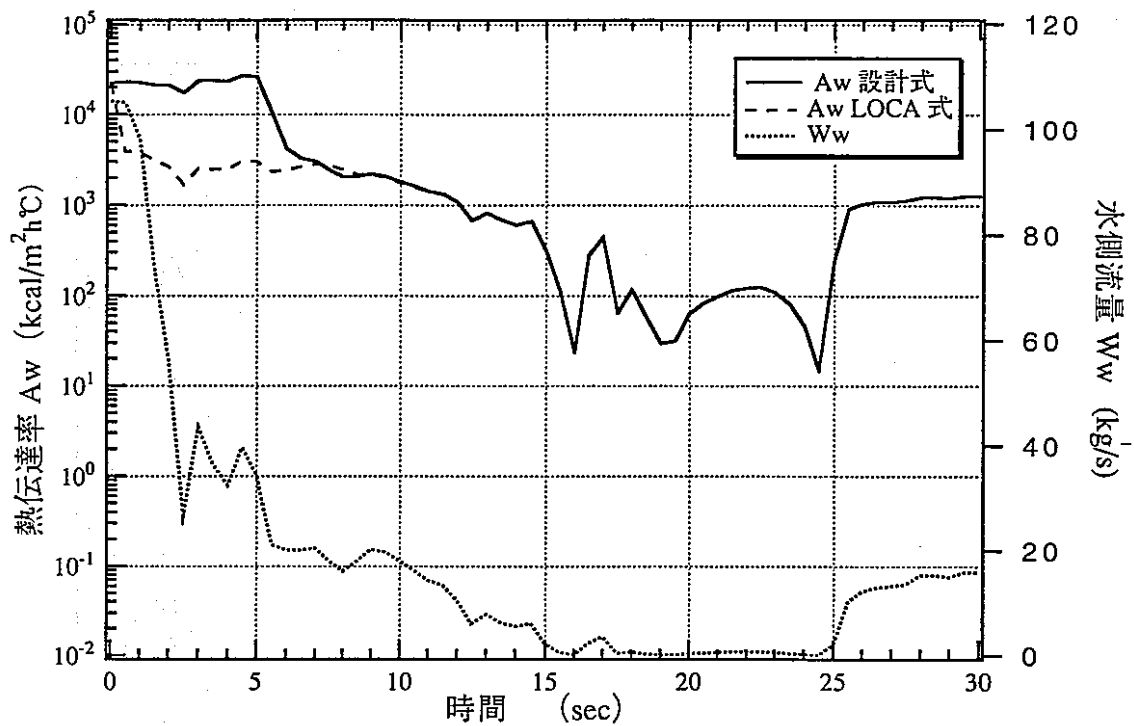


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

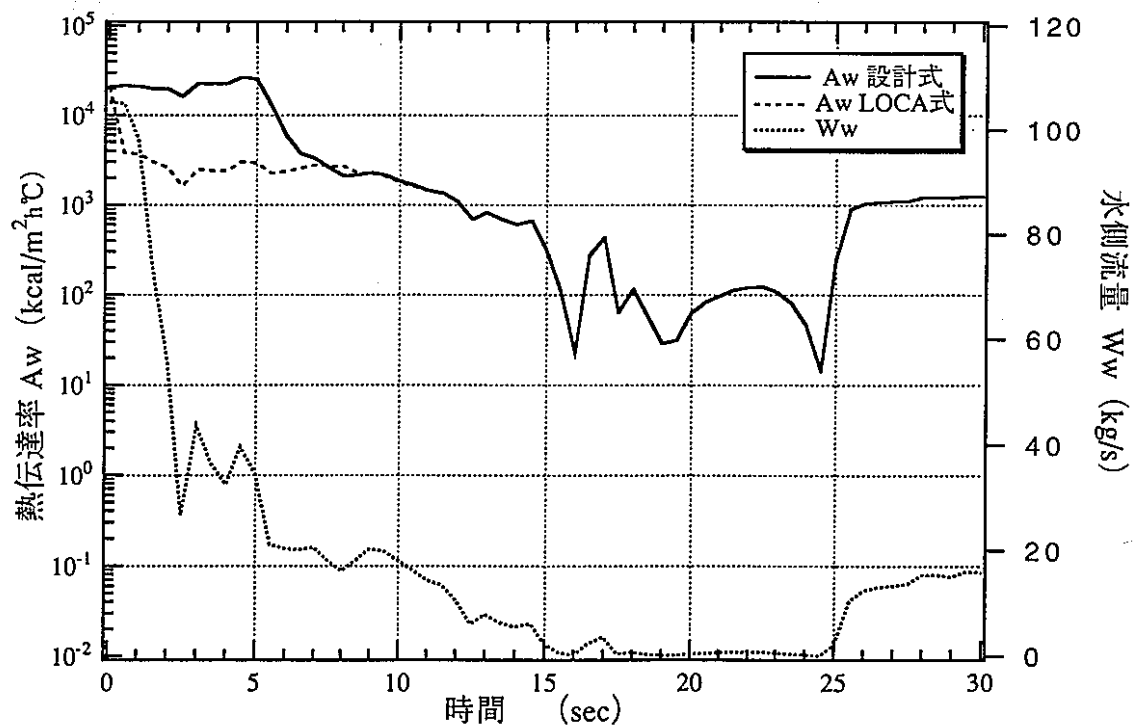


ケース1I (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (メッシュ番号20)

図 - 水側熱伝達率と流量 (EVリンク 8)



ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)



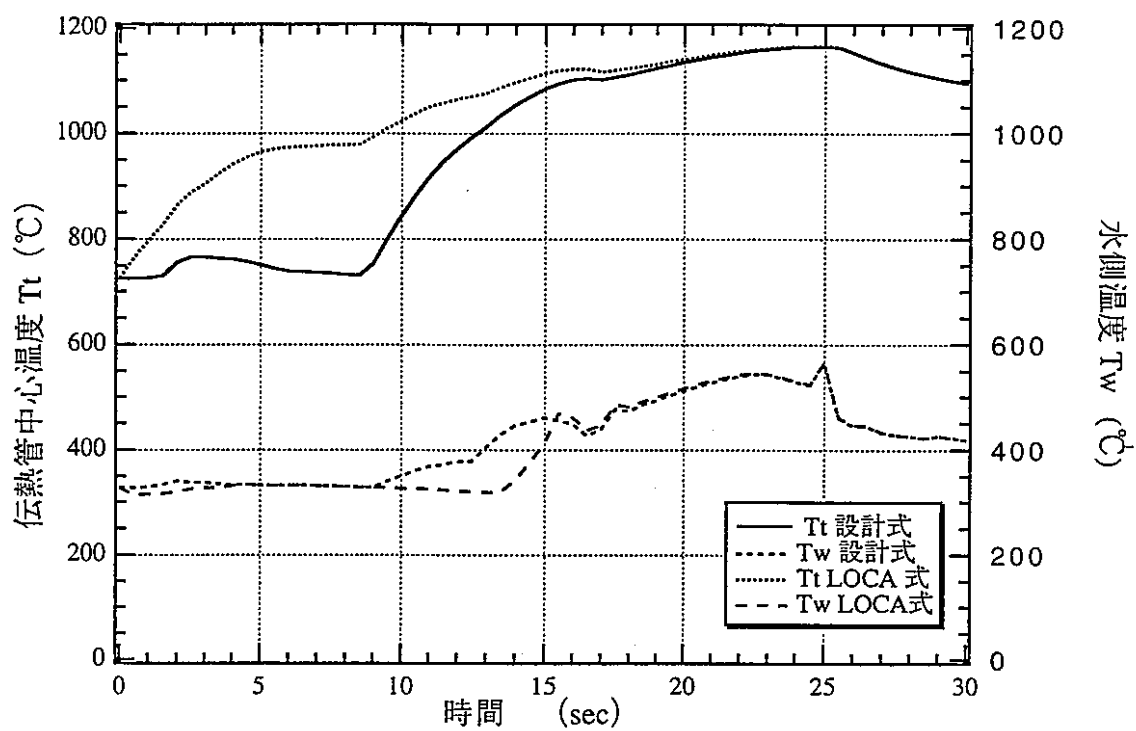
ケース1I (EV入口弁3B、EV出口弁4B) (メッシュ番号20)

図 - 水側熱伝達率と流量 (EVリンク9)

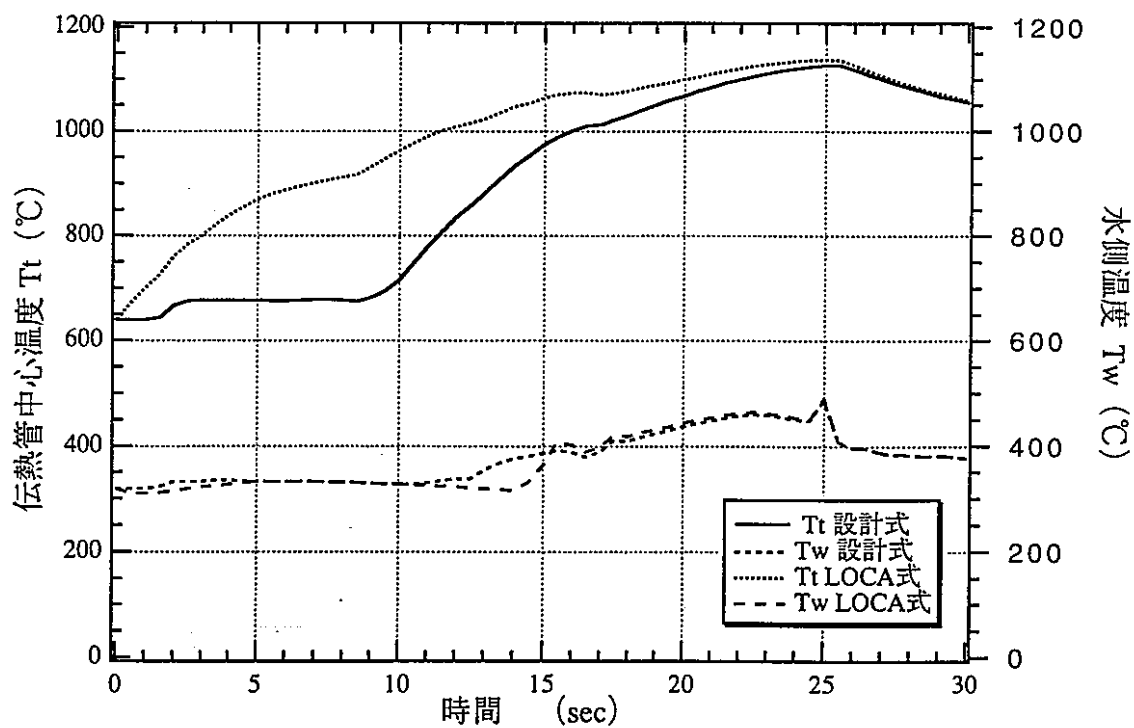
表 MjSGブロー解析ポスト処理(RUPIN)解析ケース

| 解析ケース名 | ブロー解析条件 |       | 反応条件サーベイパラメータ |                                 |          | 水側熱伝達式 | 出力  |
|--------|---------|-------|---------------|---------------------------------|----------|--------|-----|
|        | EV入口弁   | EV出口弁 | 反応温度(℃)       | 反応域熱伝達率(kcal/m <sup>2</sup> h℃) | 反応域長さ(m) |        |     |
| 1-A(1) | 3B      | 4B    | 1200          | 6000                            | 0.5      | 設計式    | 定格  |
| 1-A(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-B(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 定格  |
| 1-B(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-C(1) | 同上      | 同上    | 1100          | 8600                            | 0.5      | 設計式    | 定格  |
| 1-C(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-D(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 定格  |
| 1-D(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-E(1) | 同上      | 同上    | 1200          | 4500                            | 0.5      | 設計式    | 定格  |
| 1-E(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-F(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 定格  |
| 1-F(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-G(1) | 同上      | 同上    | 1100          | 6700                            | 0.5      | 設計式    | 定格  |
| 1-G(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-H(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 定格  |
| 1-H(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-I(1) | 同上      | 同上    | 1200~1000     | 4500~10000                      | 0.5      | 設計式    | 定格  |
| 1-I(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-J(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 3500~8600                       | 同上       | 設計式    | 定格  |
| 1-J(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 6-A(1) | 同上      | 同上    | 1200          | 6000                            | 0.5      | 設計式    | 40% |
| 6-A(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 40% |
| 6-B(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 40% |
| 6-B(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 40% |
| 6-C(1) | 同上      | 同上    | 1100          | 8600                            | 0.5      | 設計式    | 40% |
| 6-C(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 40% |
| 6-D(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 40% |
| 6-D(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 40% |
| 6-I(1) | 同上      | 同上    | 1200~1000     | 4500~10000                      | 0.5      | 設計式    | 40% |
| 6-I(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 40% |
| 6-J(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 3500~8600                       | 同上       | 設計式    | 40% |
| 6-J(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 40% |



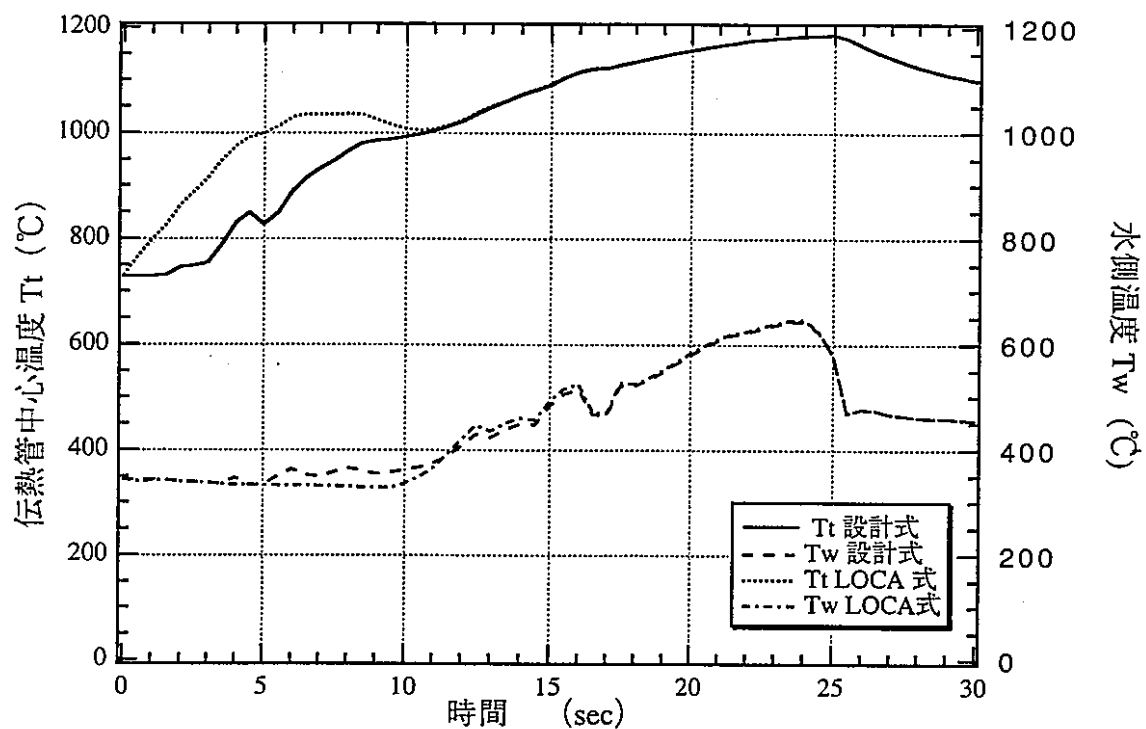


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

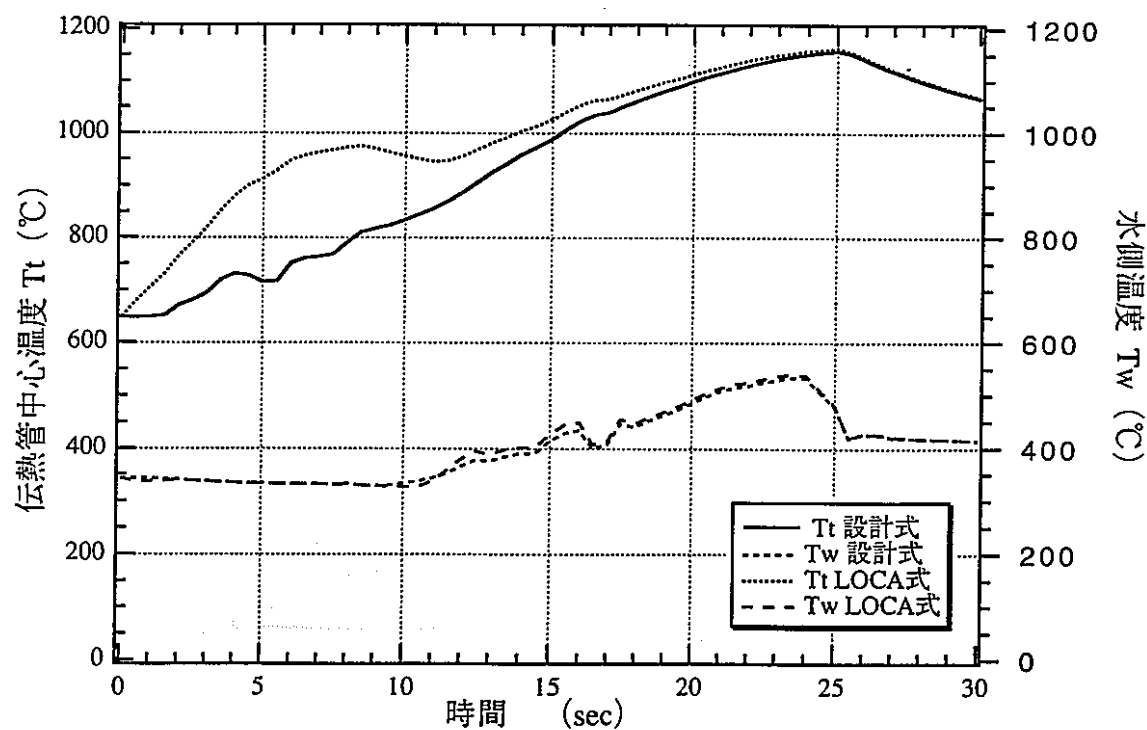


ケース1J (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (メッシュ番号14)

図 伝熱管中心温度と水側温度 (EVリンク 6)

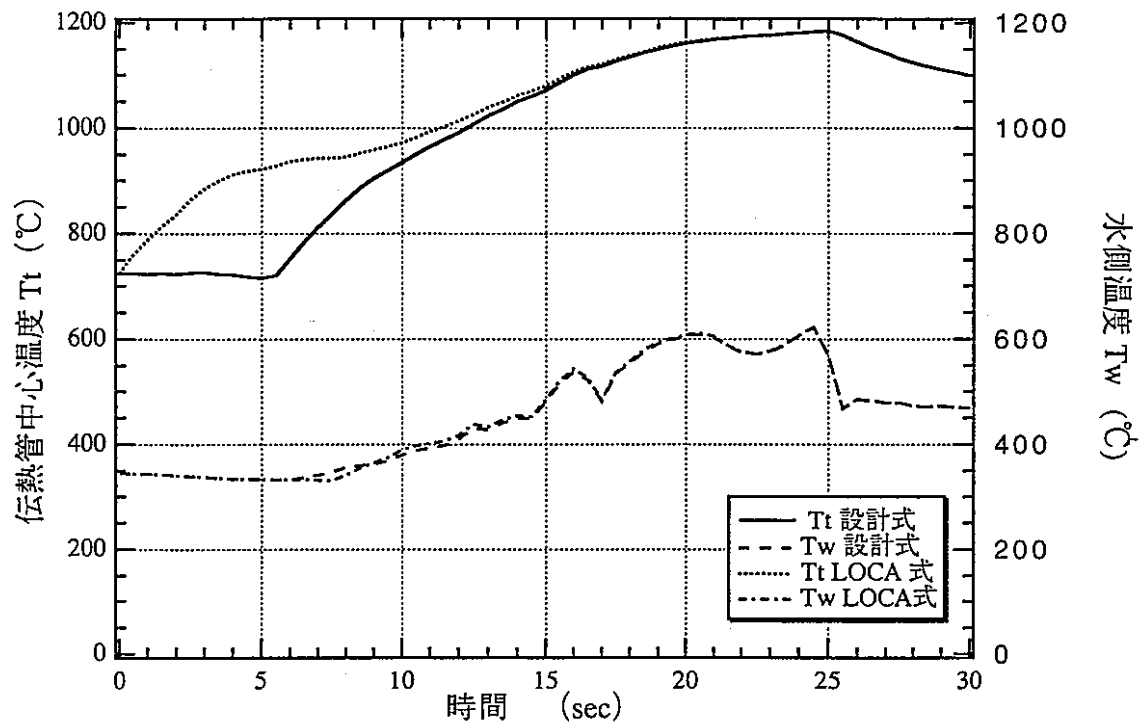


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

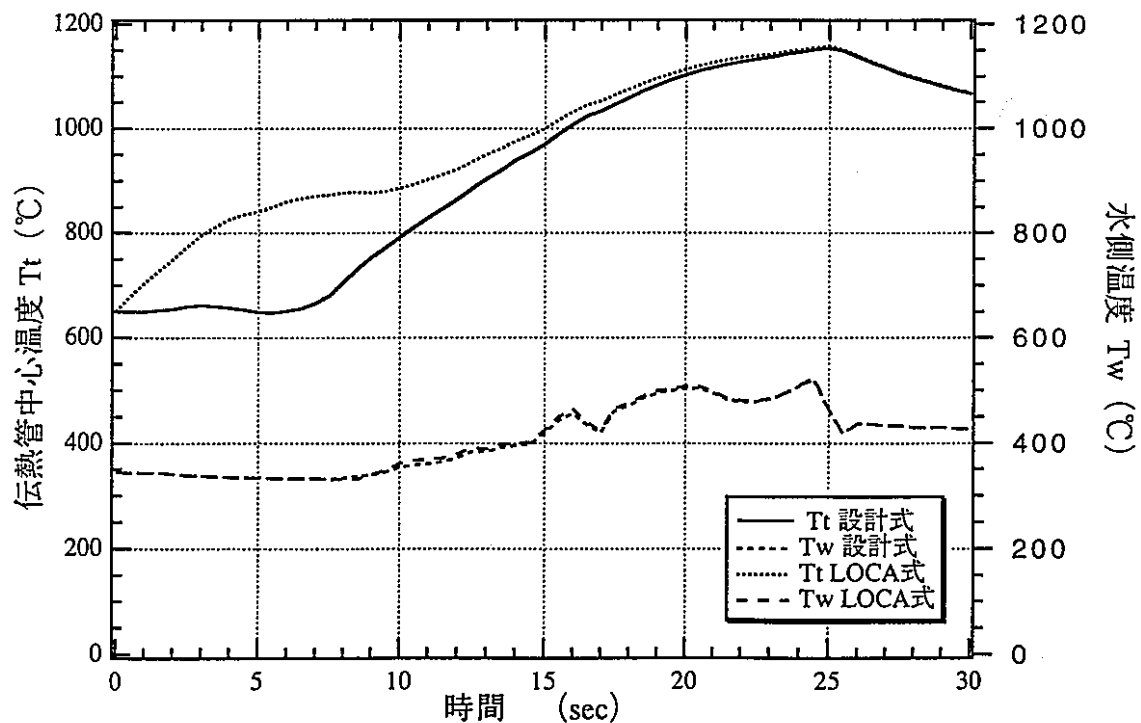


ケース1J (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (メッシュ番号14)

図 - 伝熱管中心温度と水側温度 (EVリンク 8)

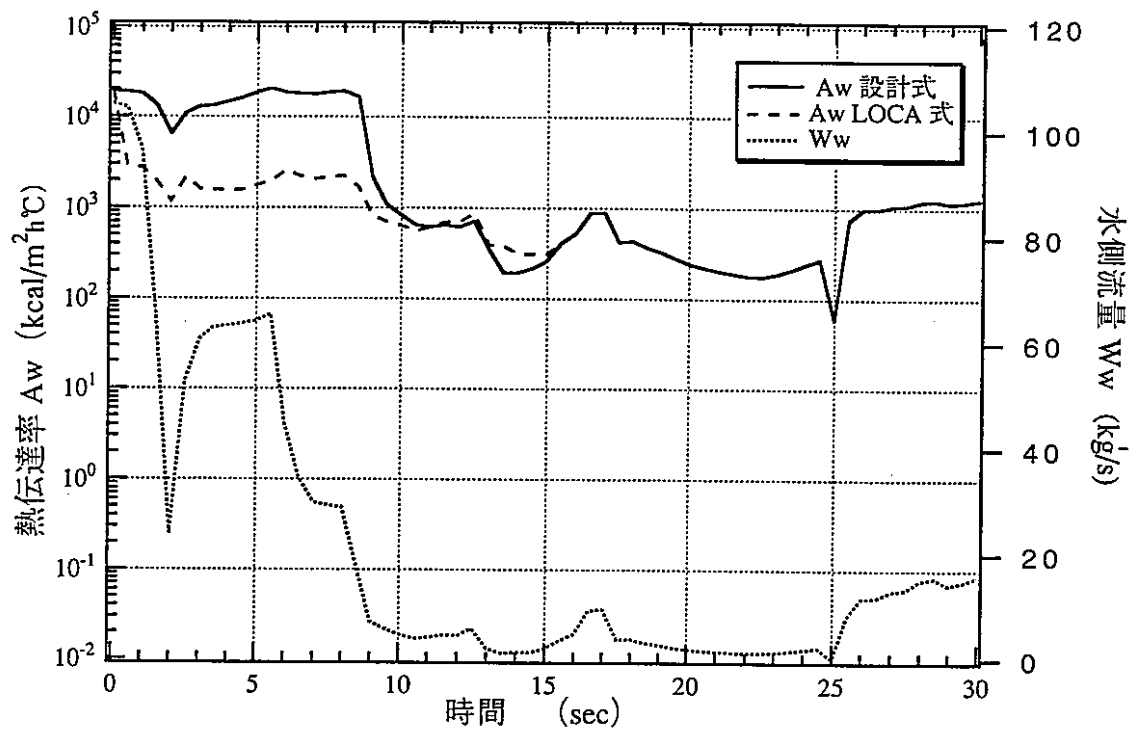


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

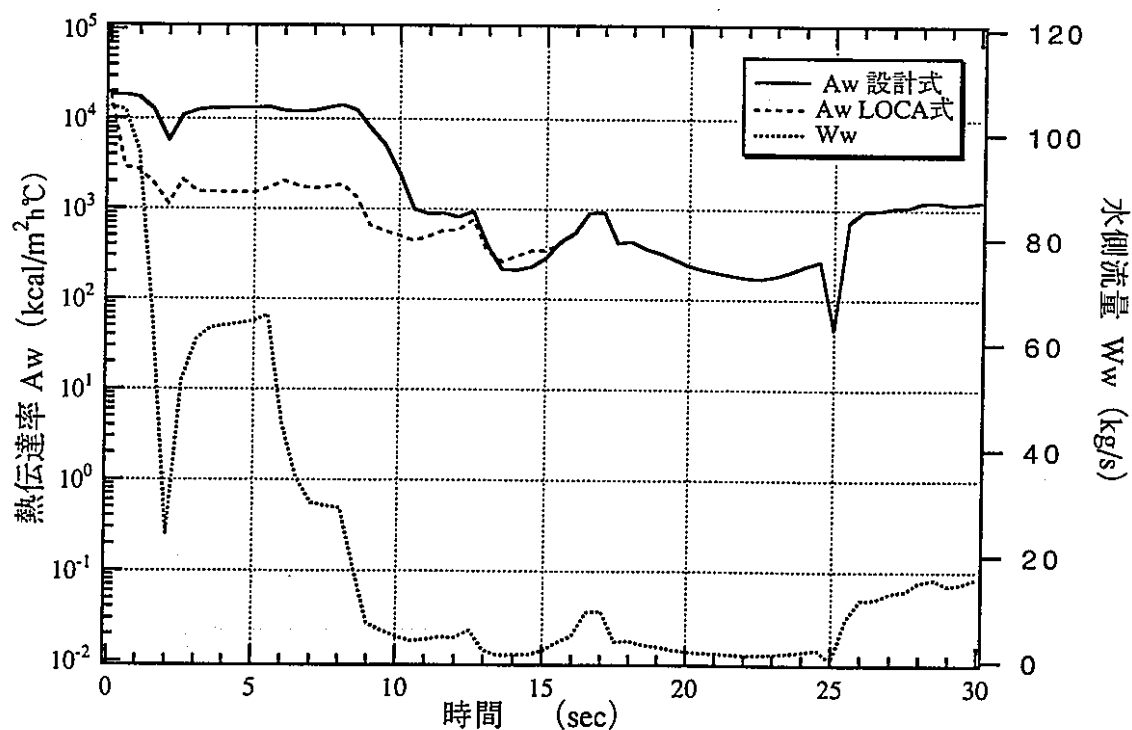


ケース1J (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (メッシュ番号14)

図 - 伝熱管中心温度と水側温度 (EVリンク 9)

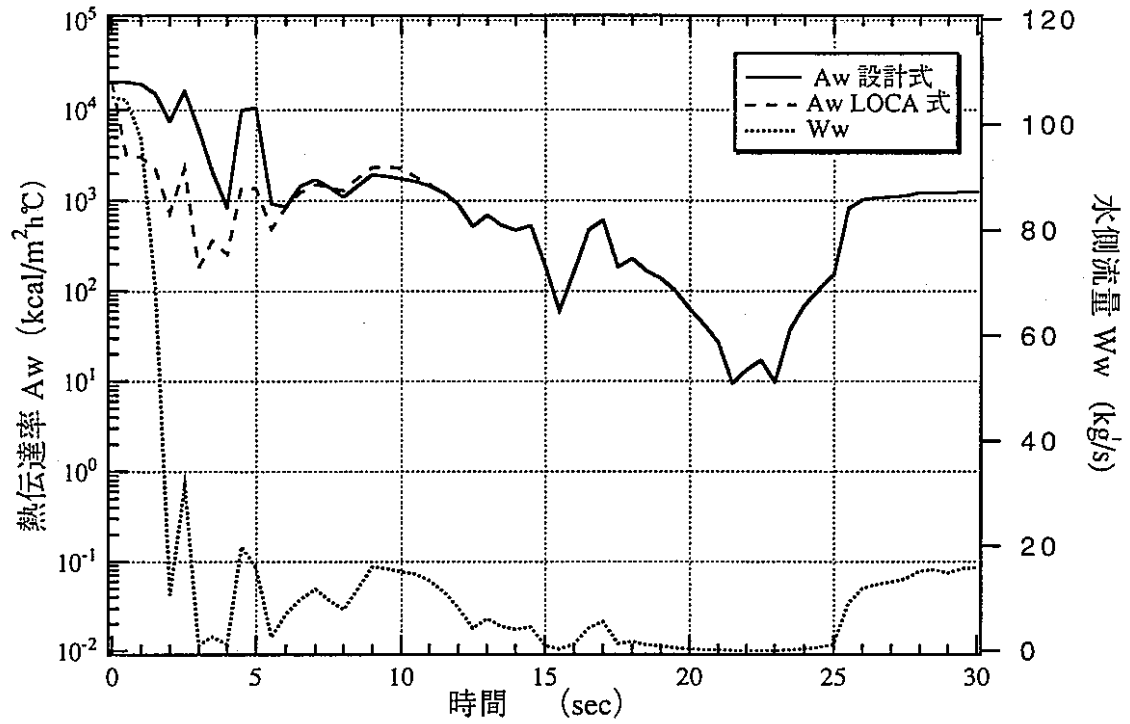


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

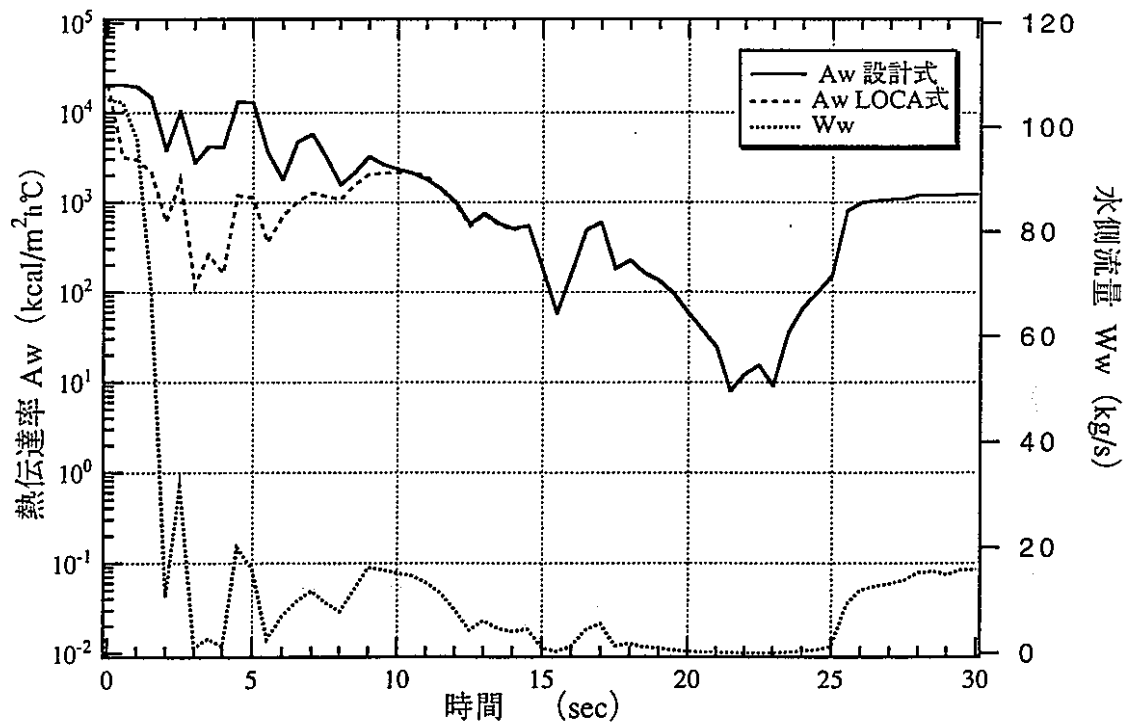


ケース1J (EV入口弁3B、EV出口弁4B) (メッシュ番号14)

図 - 水側熱伝達率と流量 (EVリンク6)

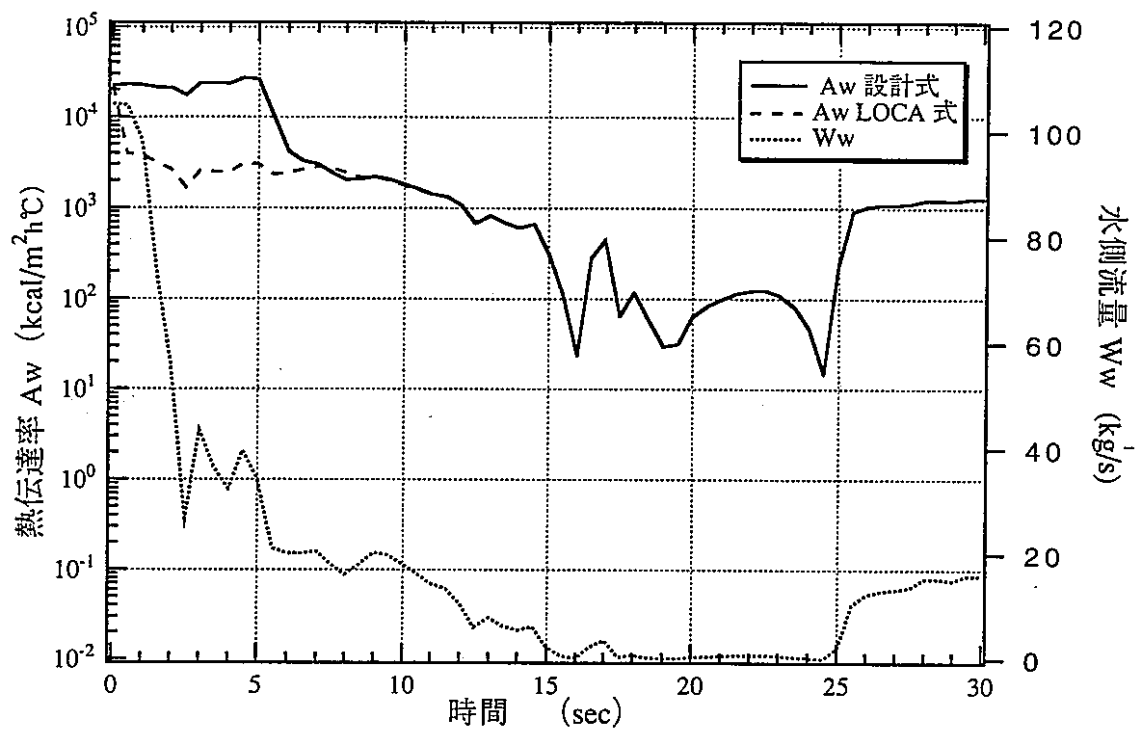


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

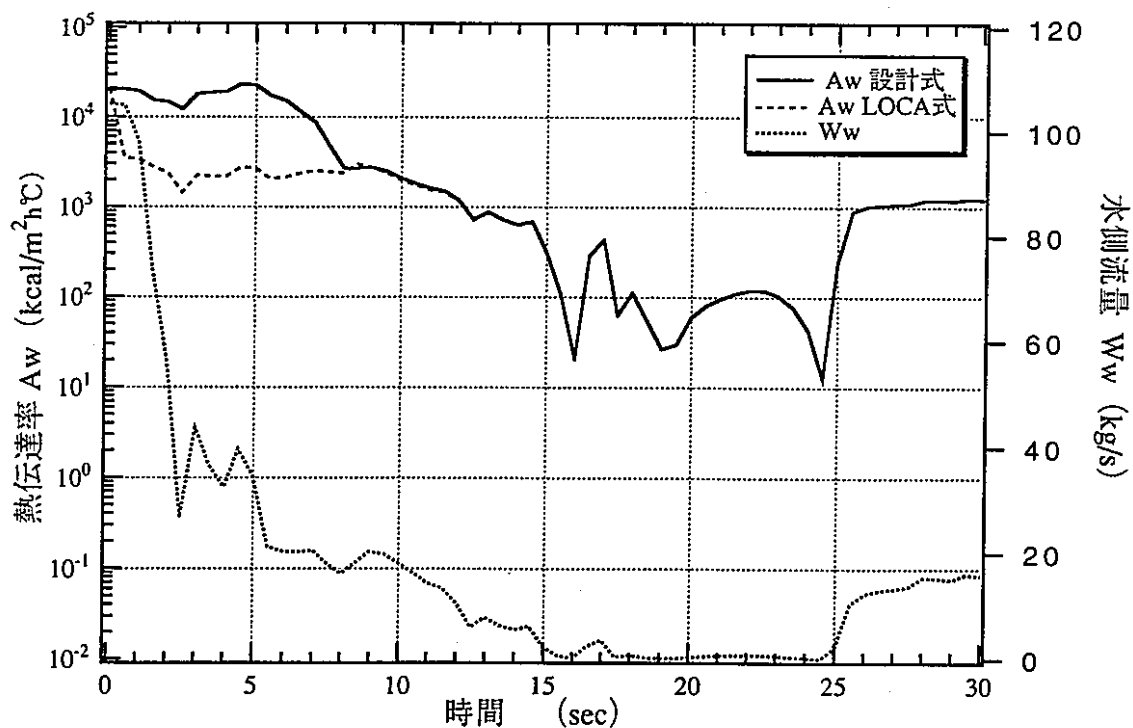


ケース1J (EV入口弁3B、EV出口弁4B) (メッシュ番号14)

図 - 水側熱伝達率と流量 (EVリンク8)

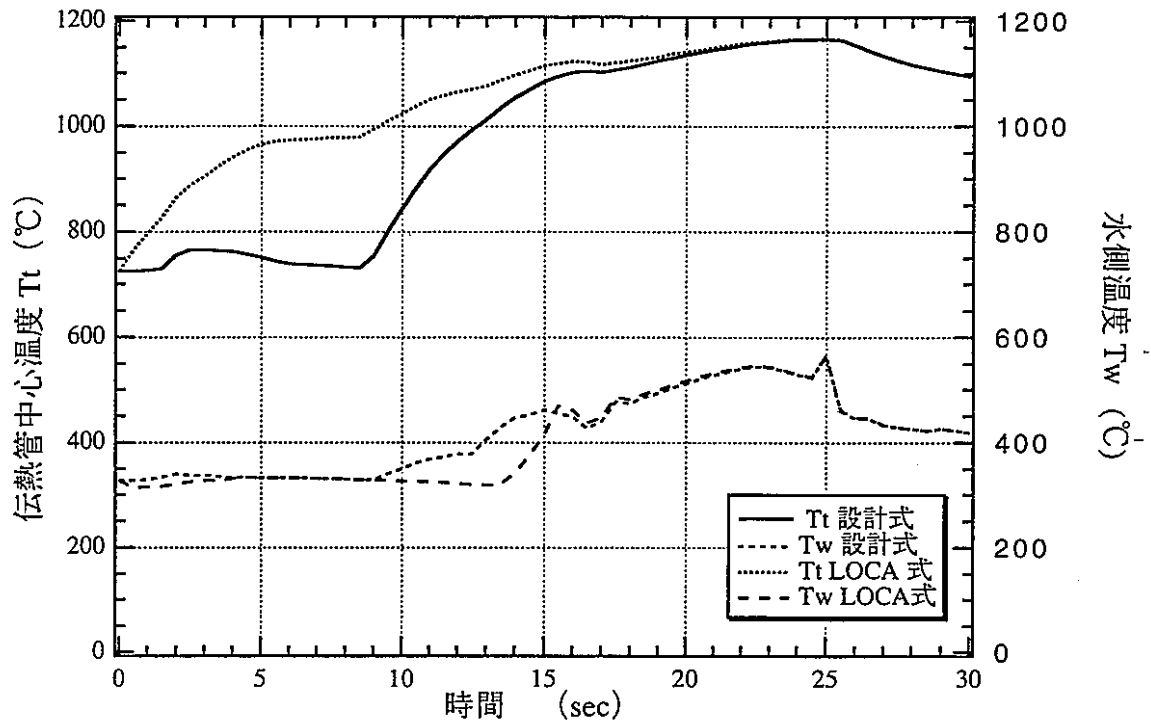


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

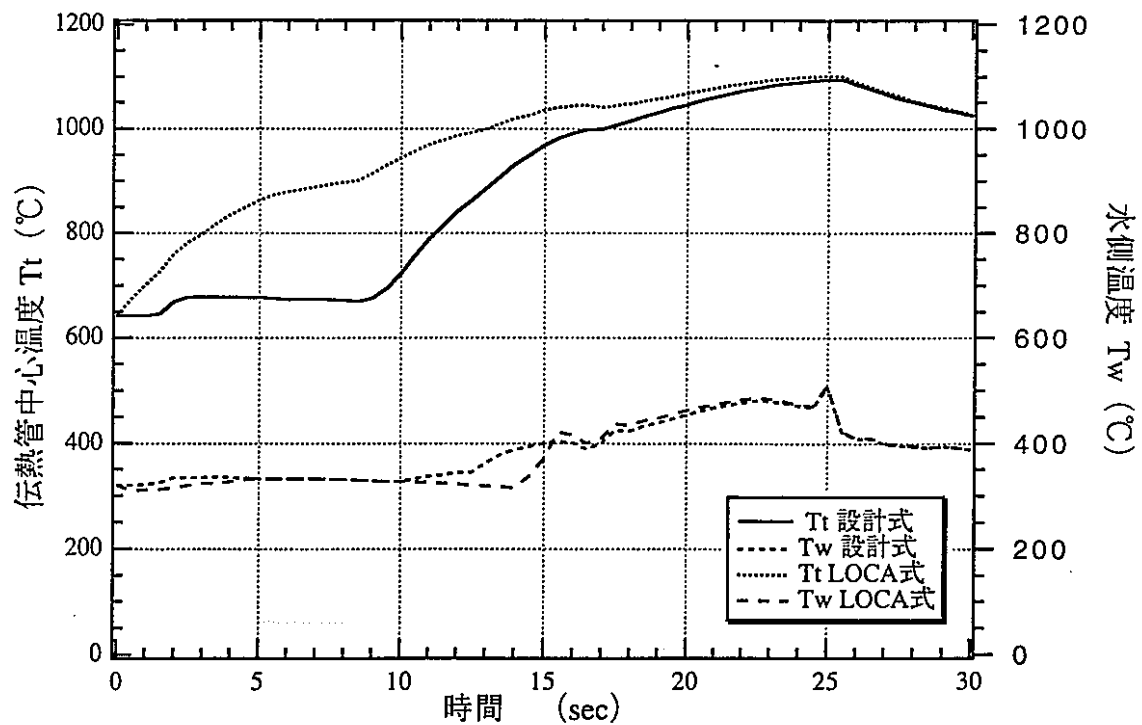


ケース1J (EV入口弁3B、EV出口弁4B) (メッシュ番号14)

図 - 水側熱伝達率と流量 (EVリンク9)

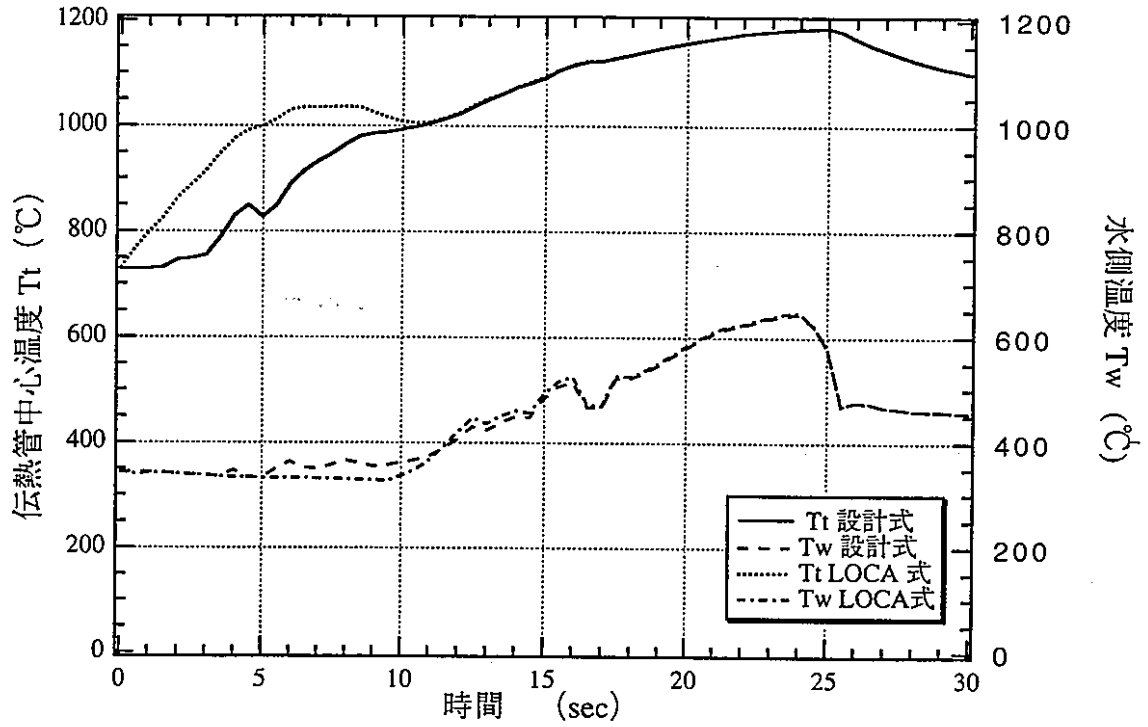


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

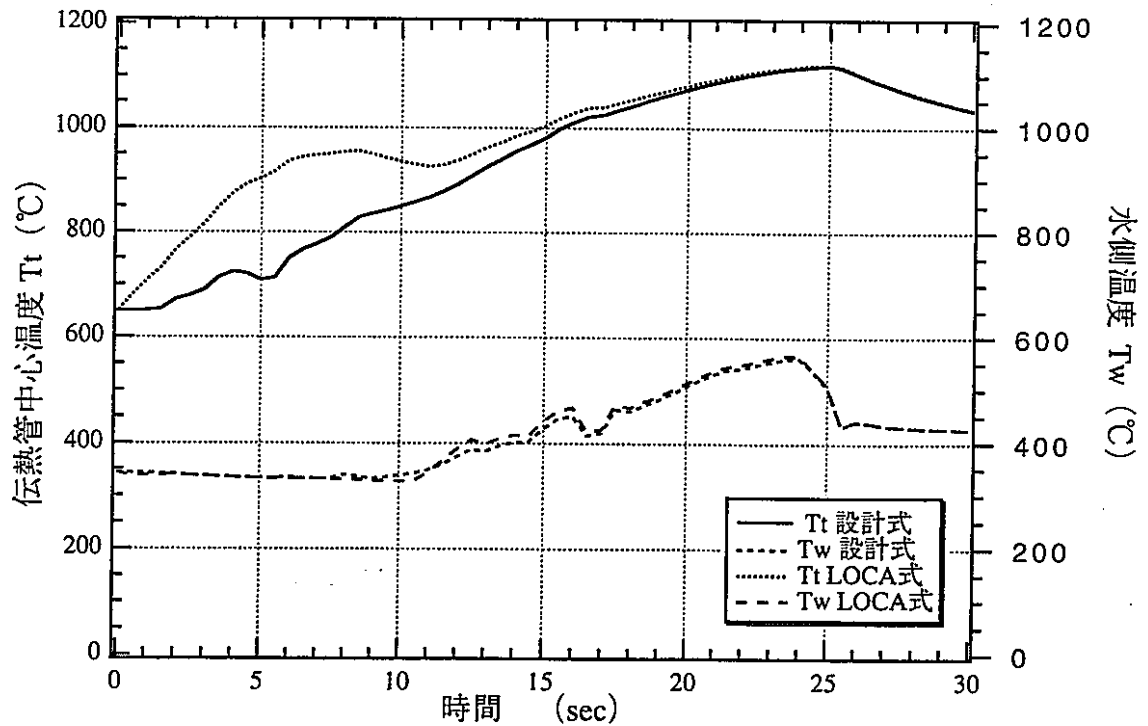


ケース1J (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (メッシュ番号16)

図 - 伝熱管中心温度と水側温度 (EVリンク6)



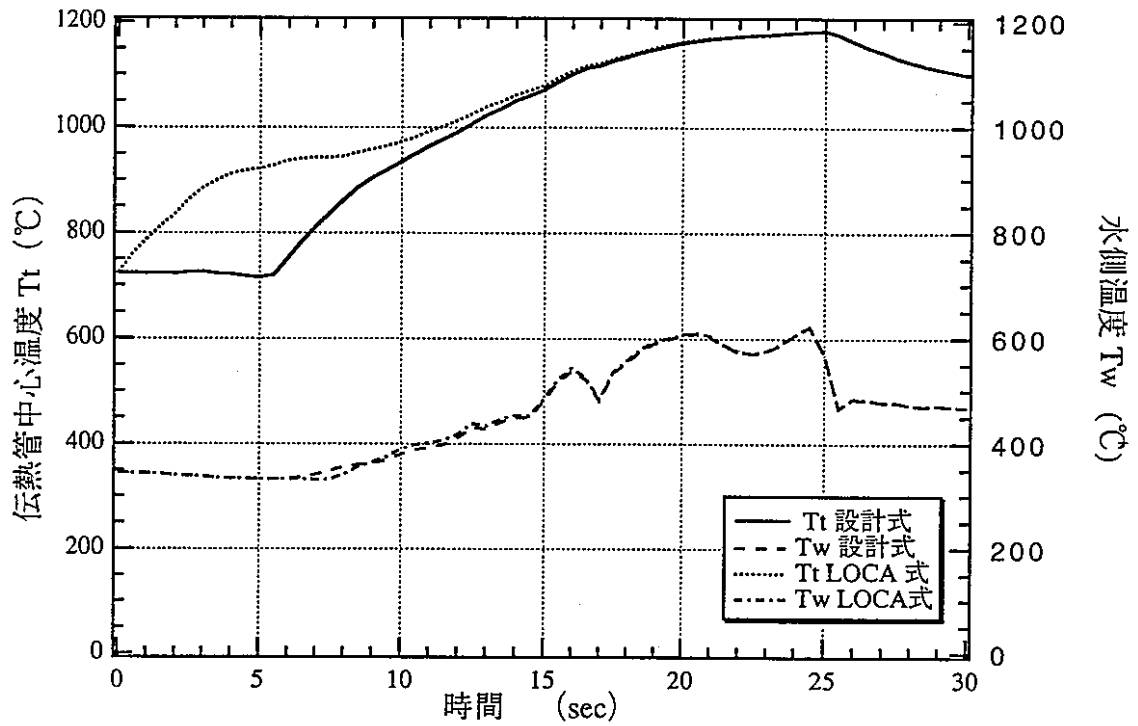
ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)



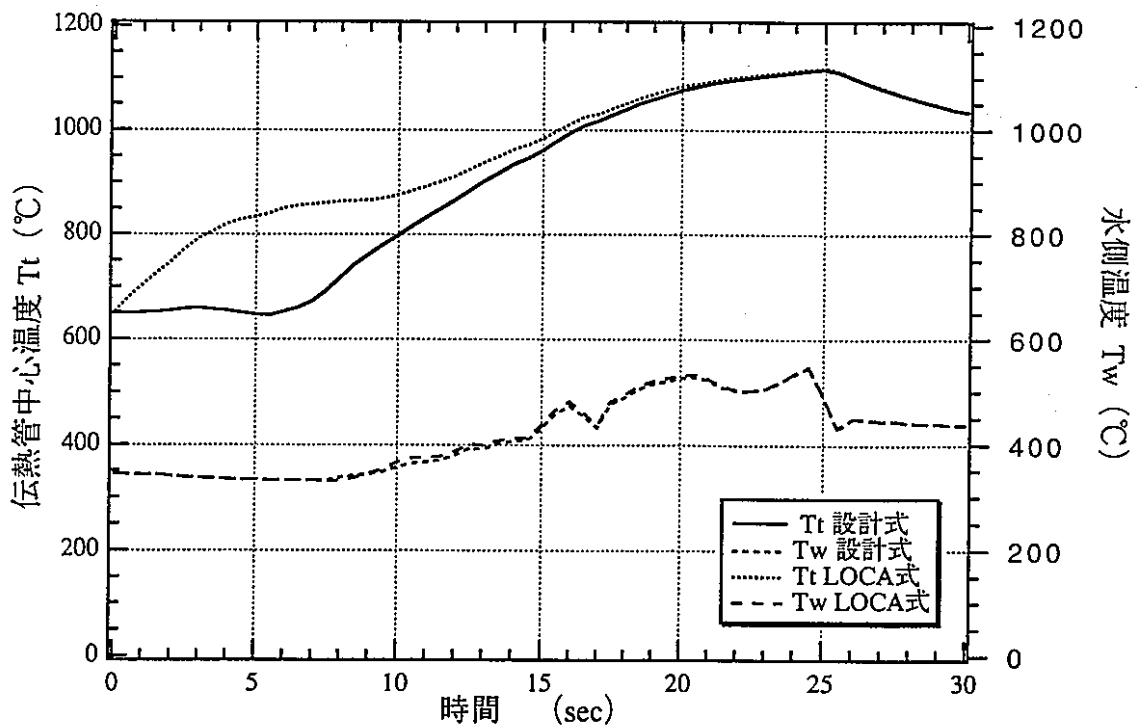
ケース1J (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (メッシュ番号16)

図 - 伝熱管中心温度と水側温度 (EVリンク 8)



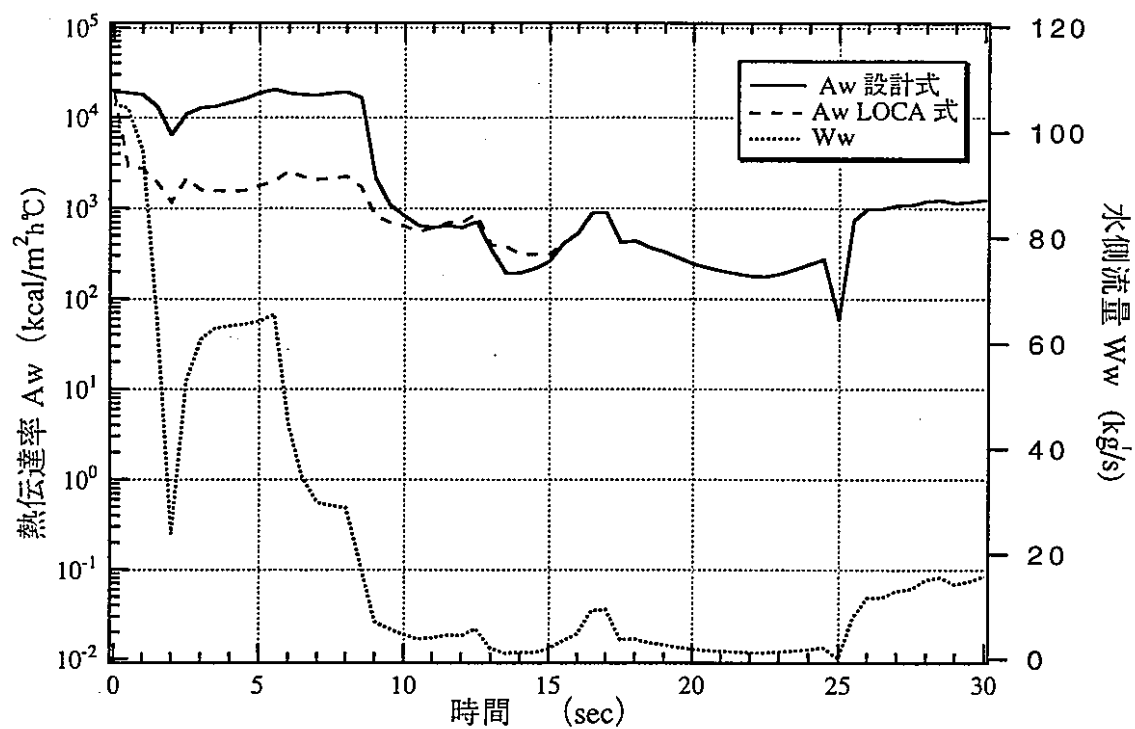


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

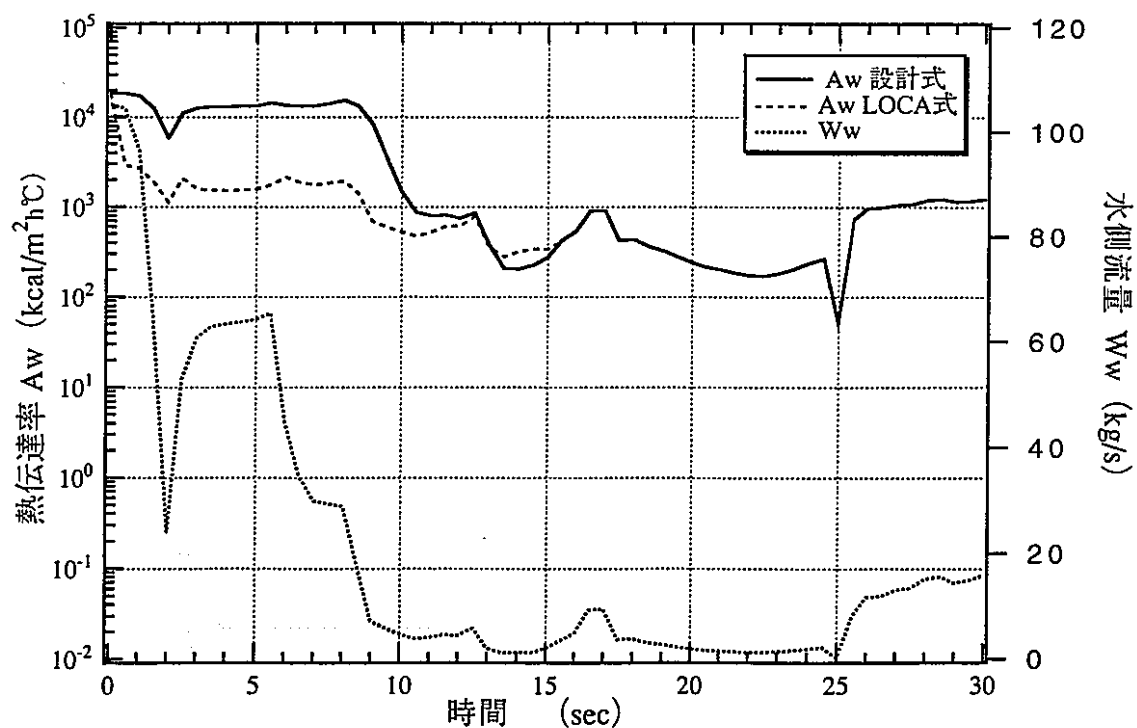


ケース1J (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (メッシュ番号16)

図 - 伝熱管中心温度と水側温度 (EVリンク 9)

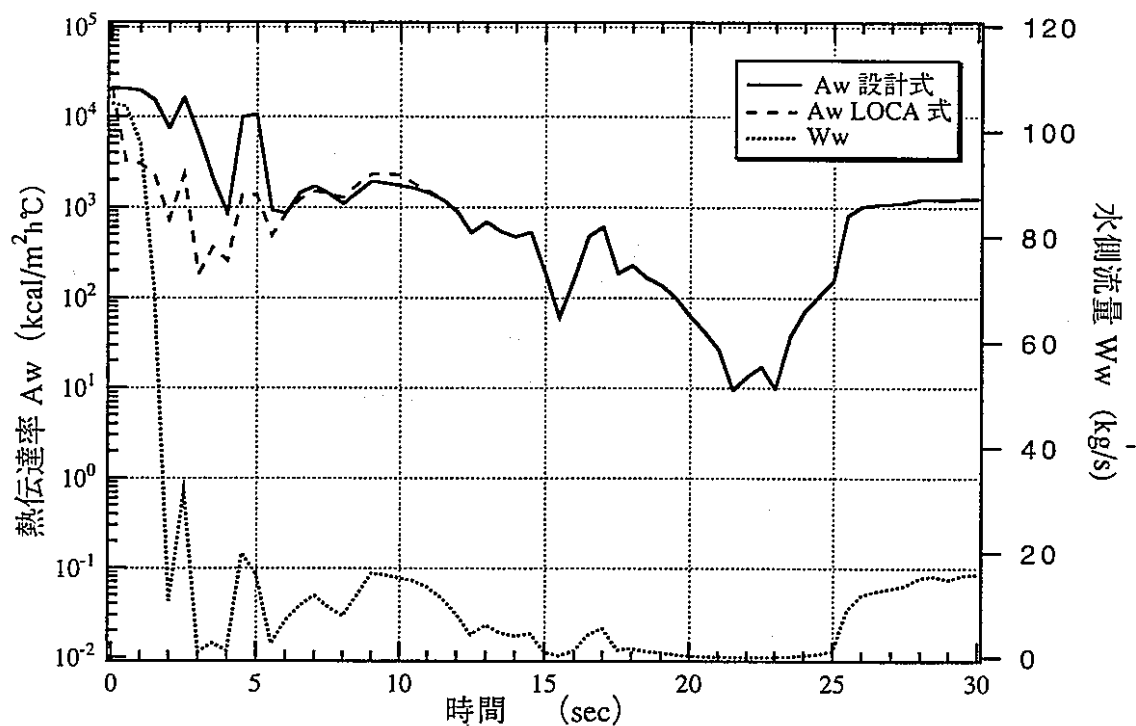


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

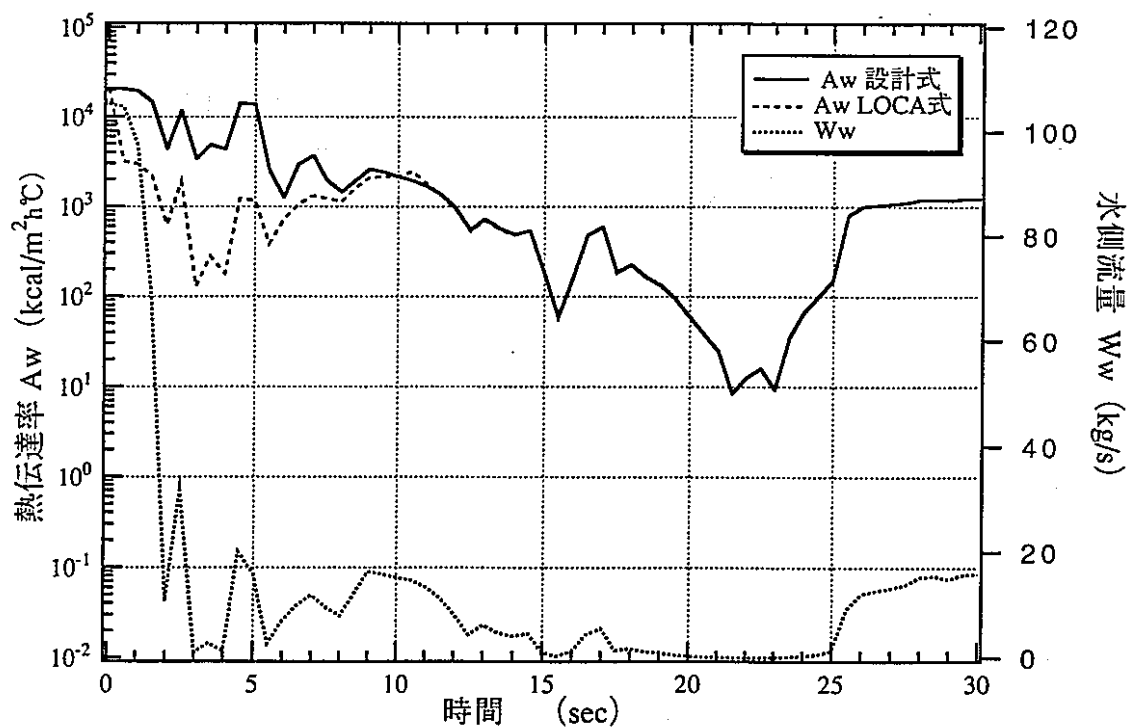


ケース1J (EV入口弁3B、EV出口弁4B) (メッシュ番号16)

図 - 水側熱伝達率と流量 (EVリンク6)

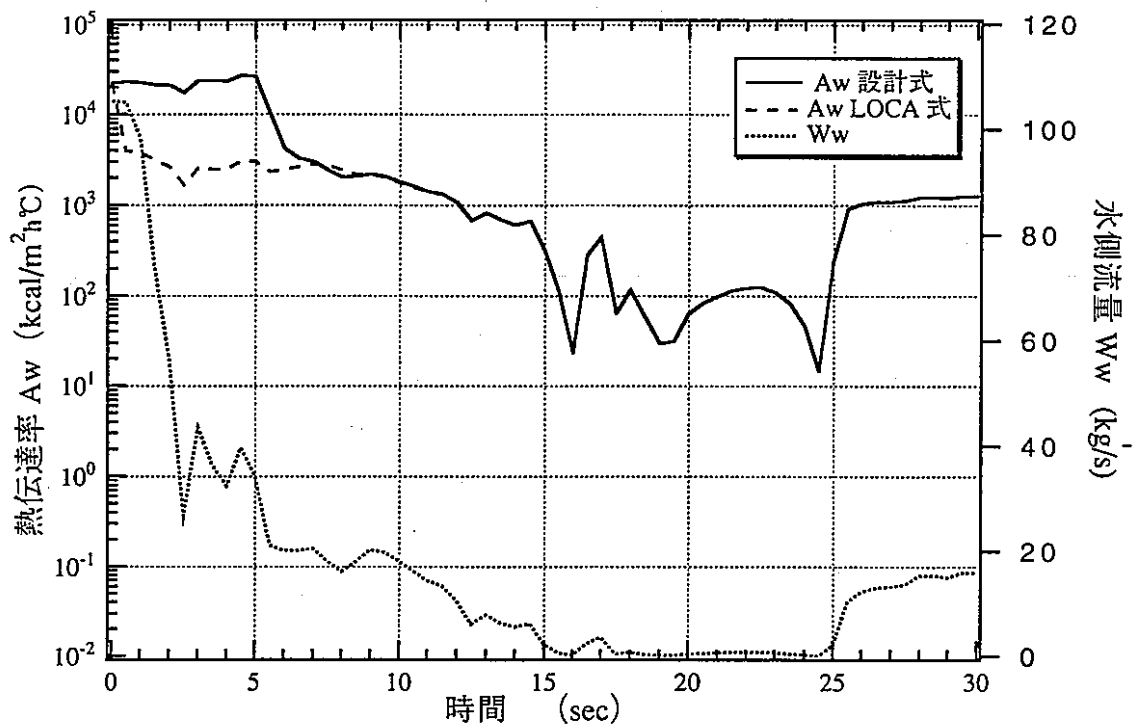


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

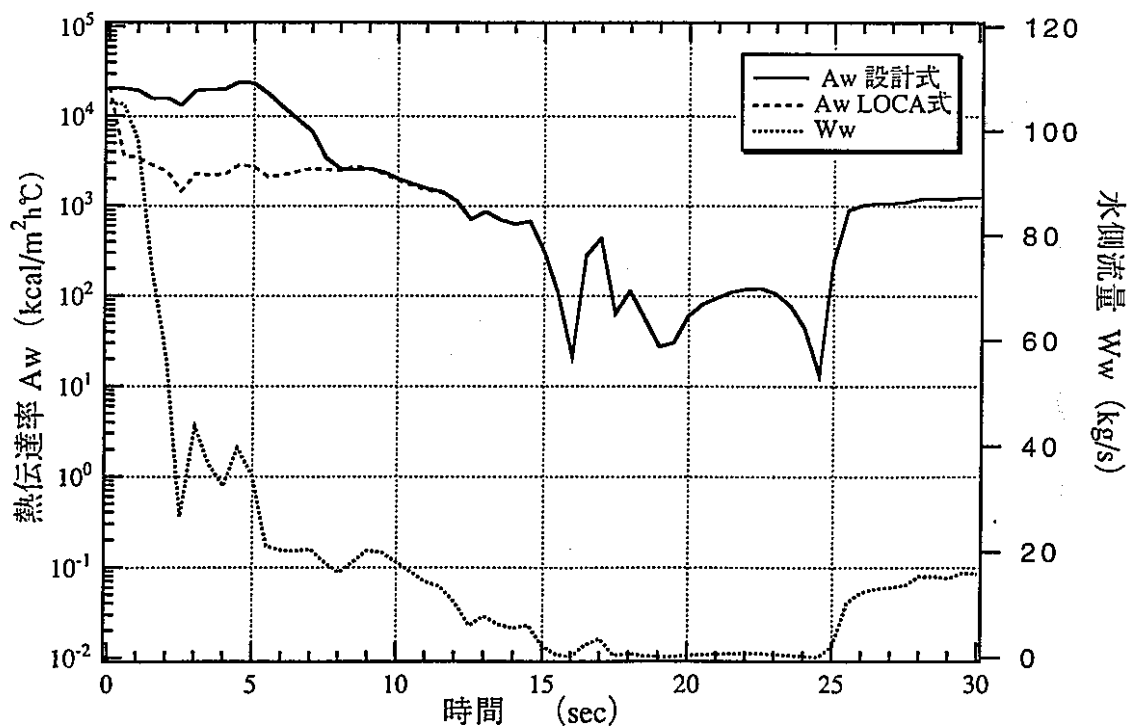


ケース1J (EV入口弁3B、EV出口弁4B) (メッシュ番号16)

図 - 水側熱伝達率と流量 (EVリンク8)

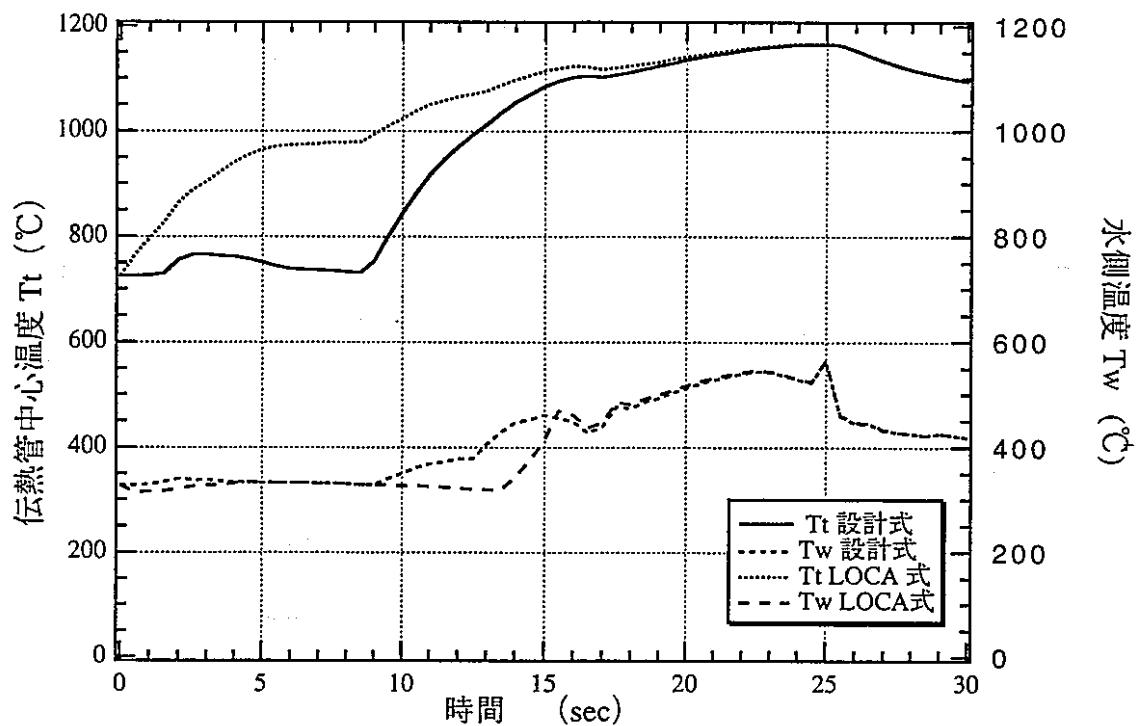


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

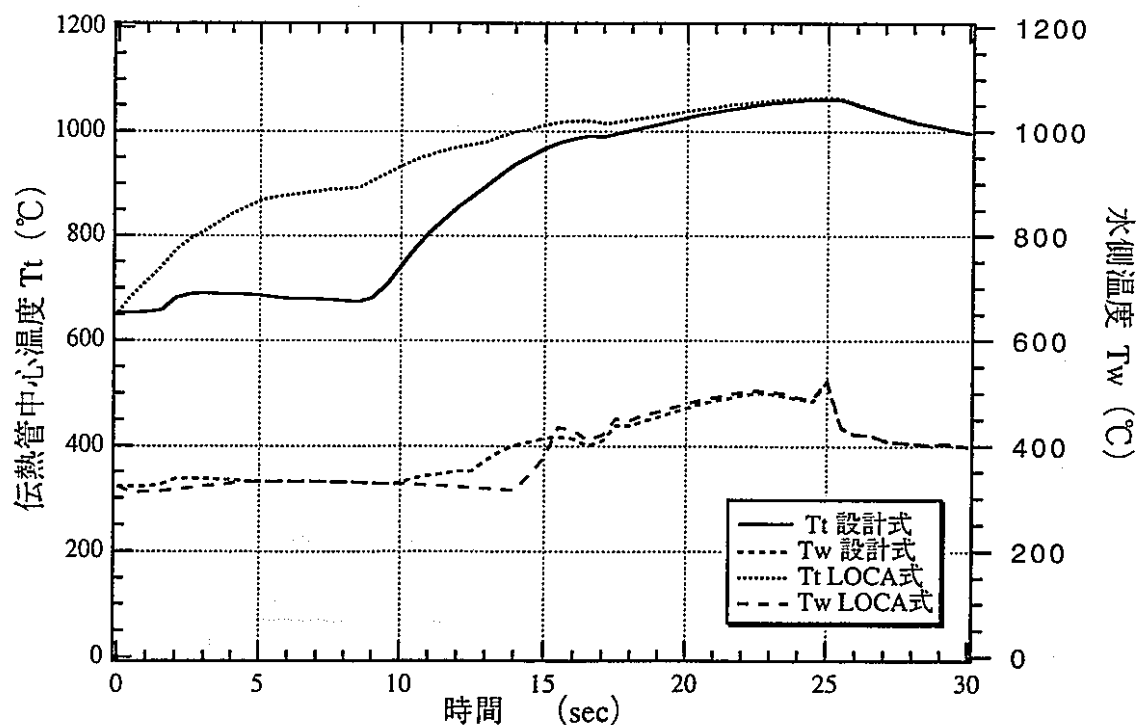


ケース1J (EV入口弁3B、EV出口弁4B) (メッシュ番号16)

図 - 水側熱伝達率と流量 (EVリンク9)

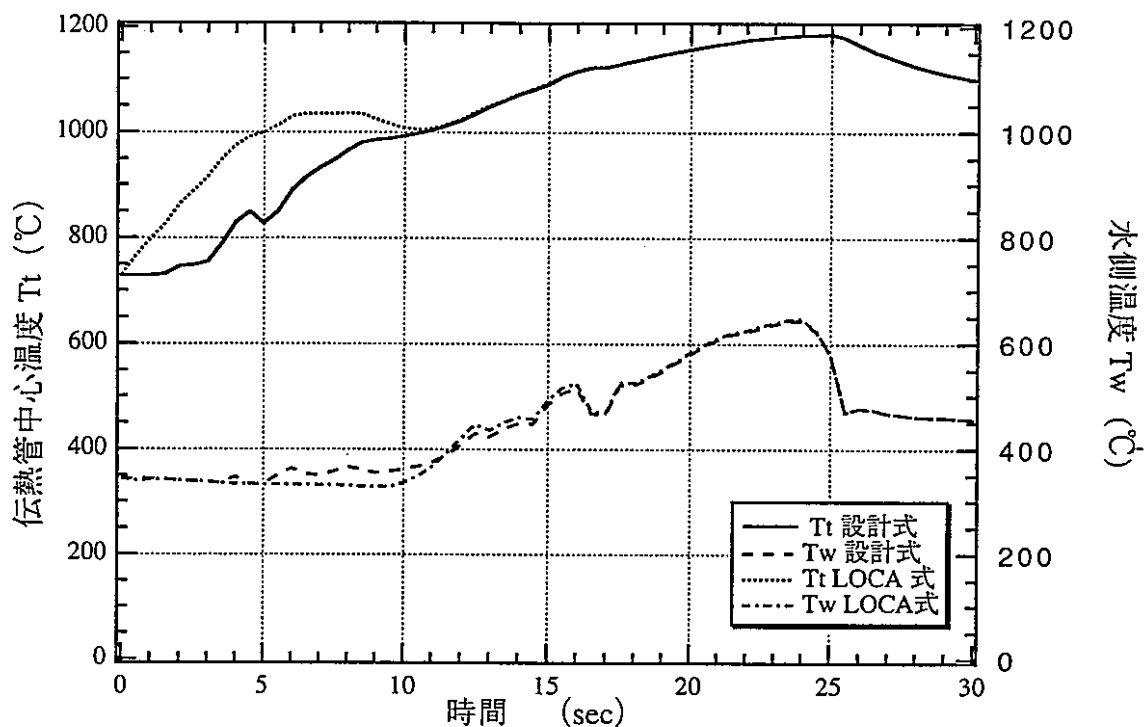


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

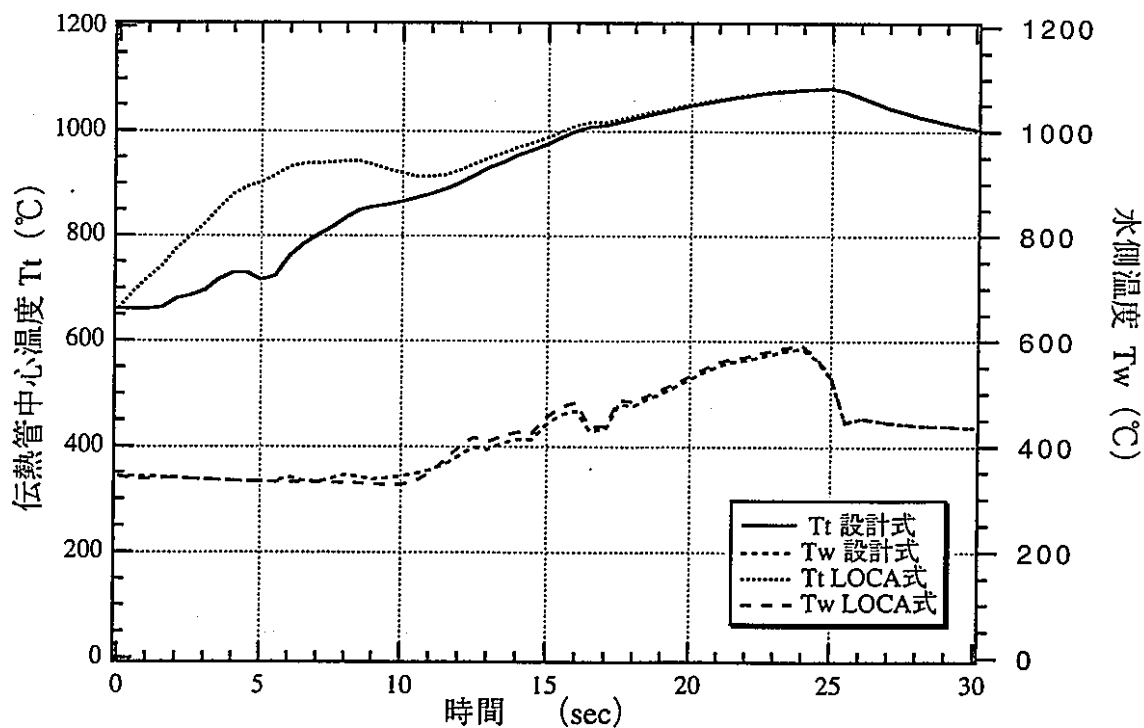


ケース1J (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (メッシュ番号18)

図 - 伝熱管中心温度と水側温度 (EVリンク 6)

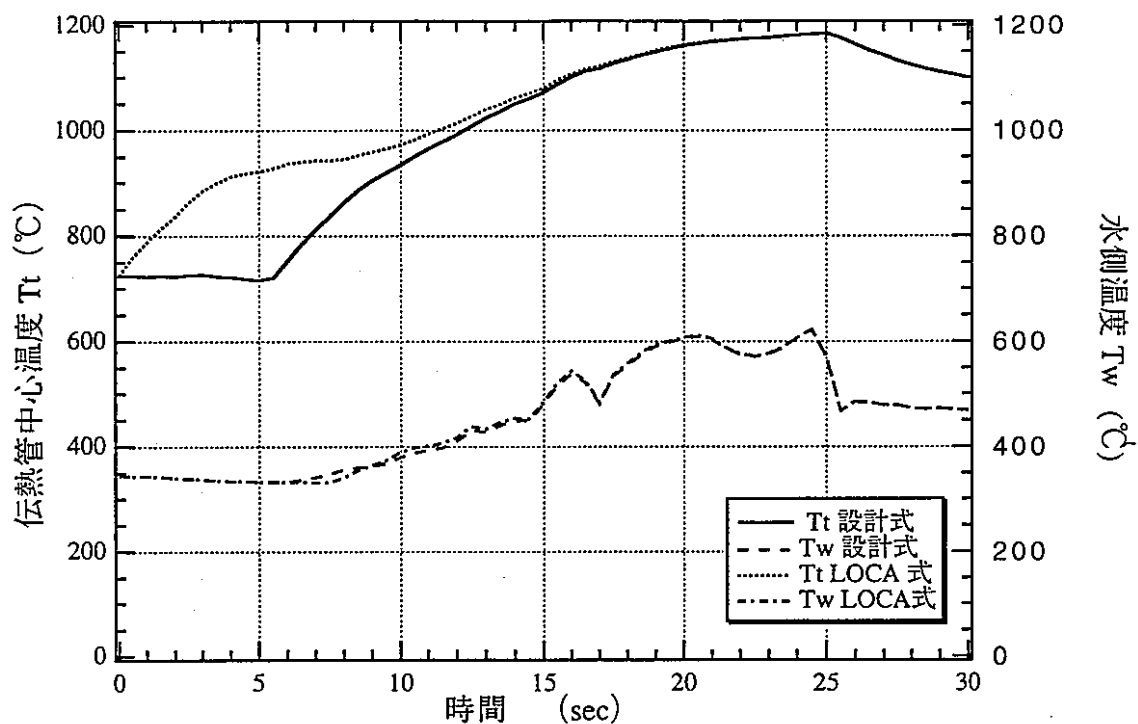


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

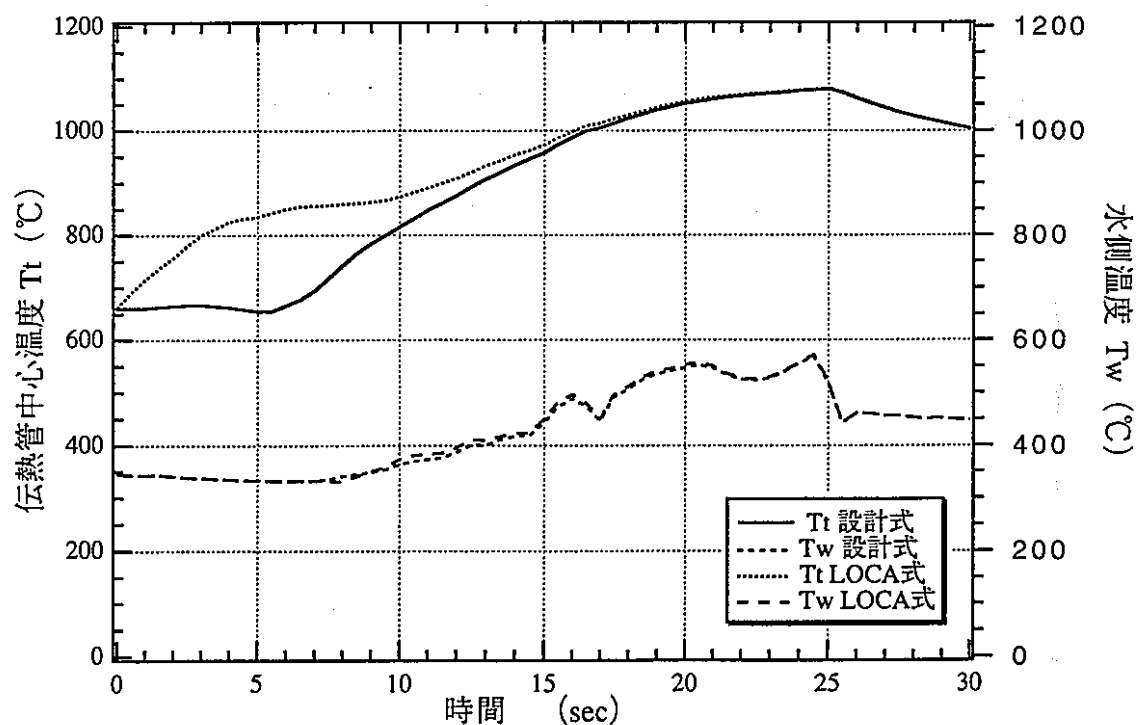


ケース1J (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (メッシュ番号18)

図 - 伝熱管中心温度と水側温度 (EVリンク 8)

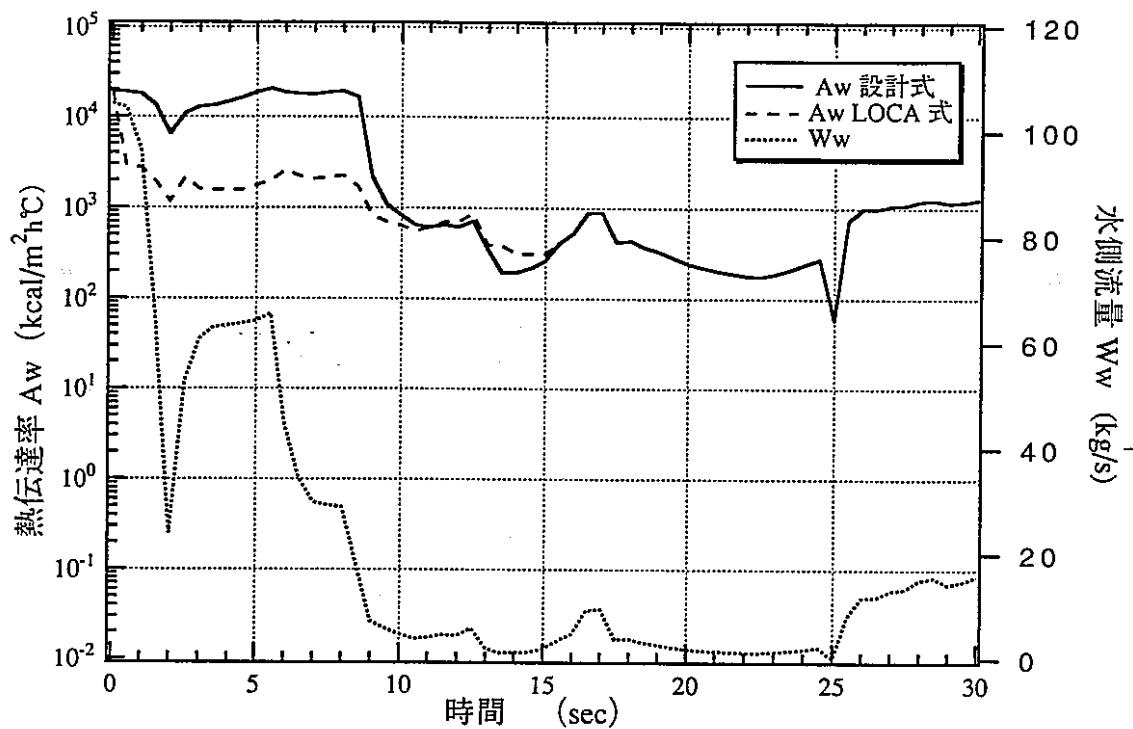


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

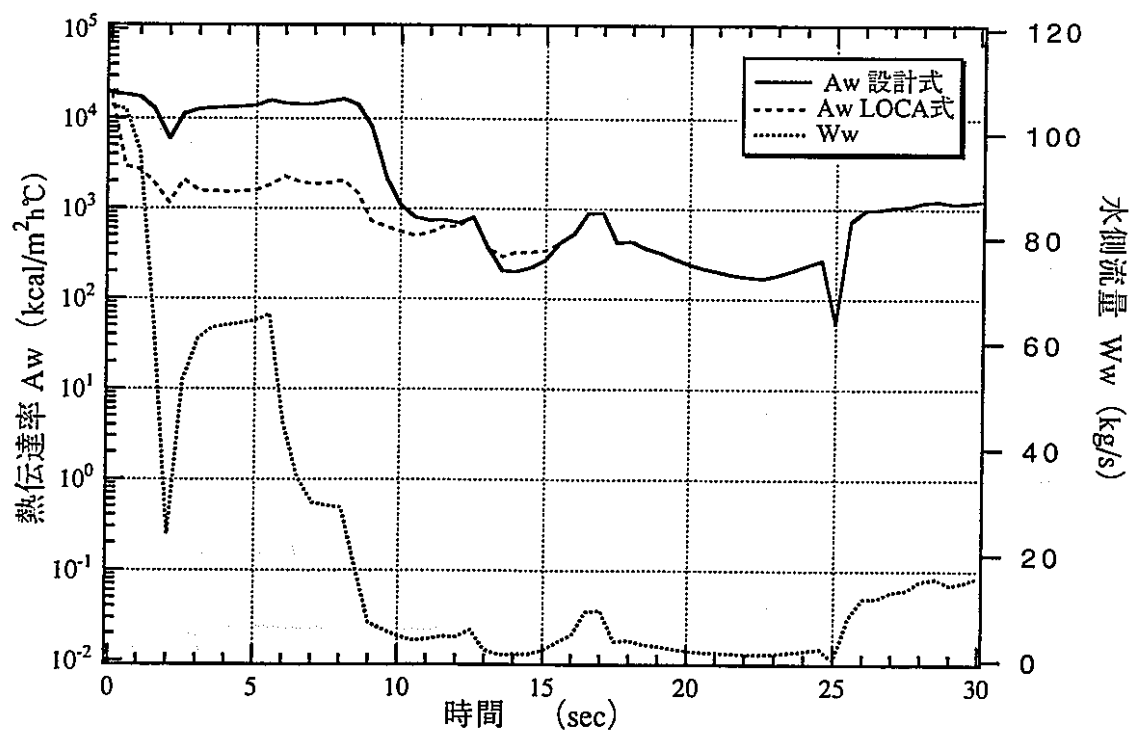


ケース1J (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (メッシュ番号18)

図 - 伝熱管中心温度と水側温度 (EVリンク 9)



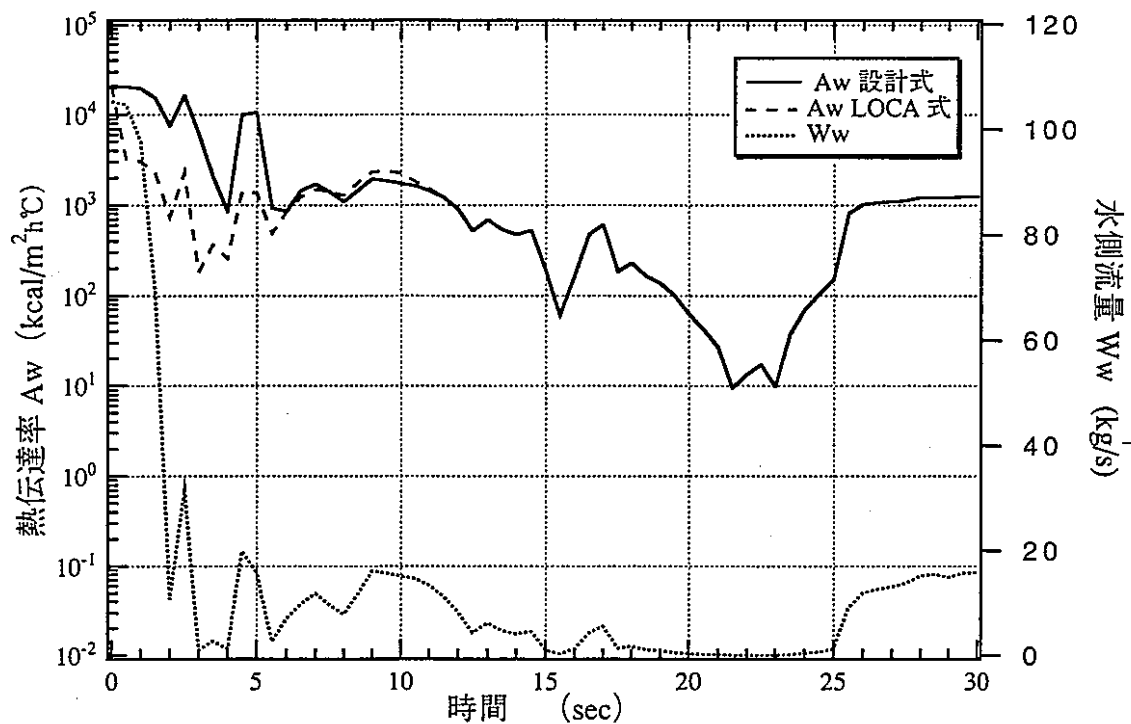
ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)



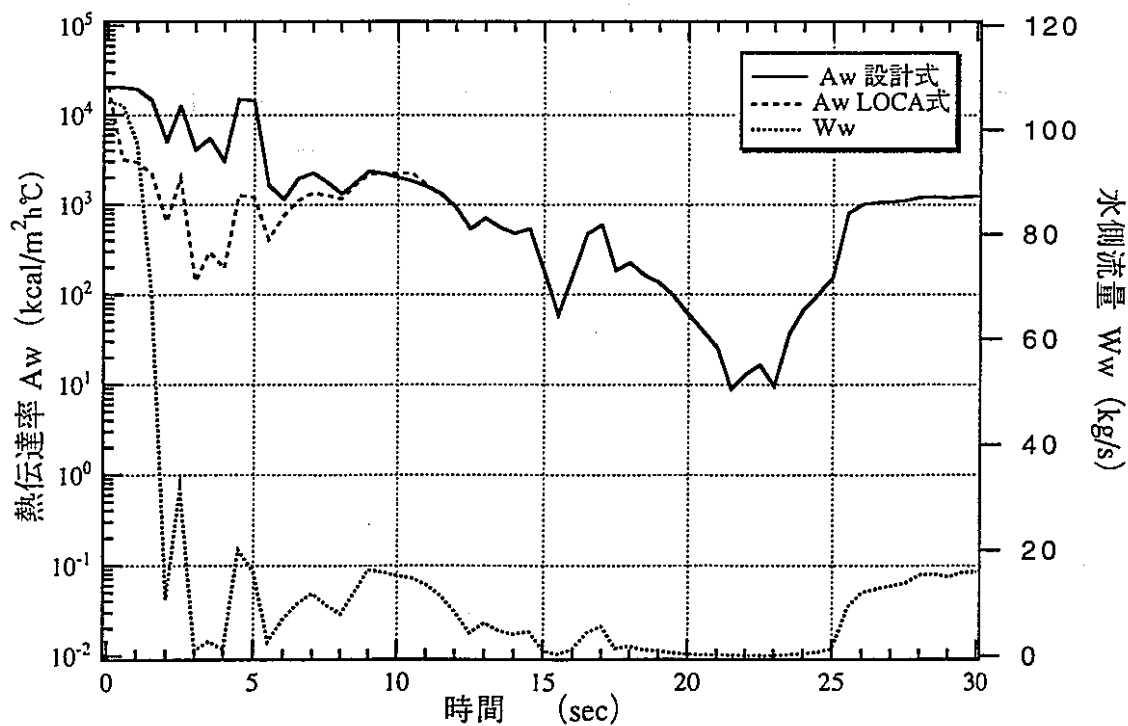
ケース1J (EV入口弁3B、EV出口弁4B) (メッシュ番号18)

図 - 水側熱伝達率と流量 (EVリンク6)



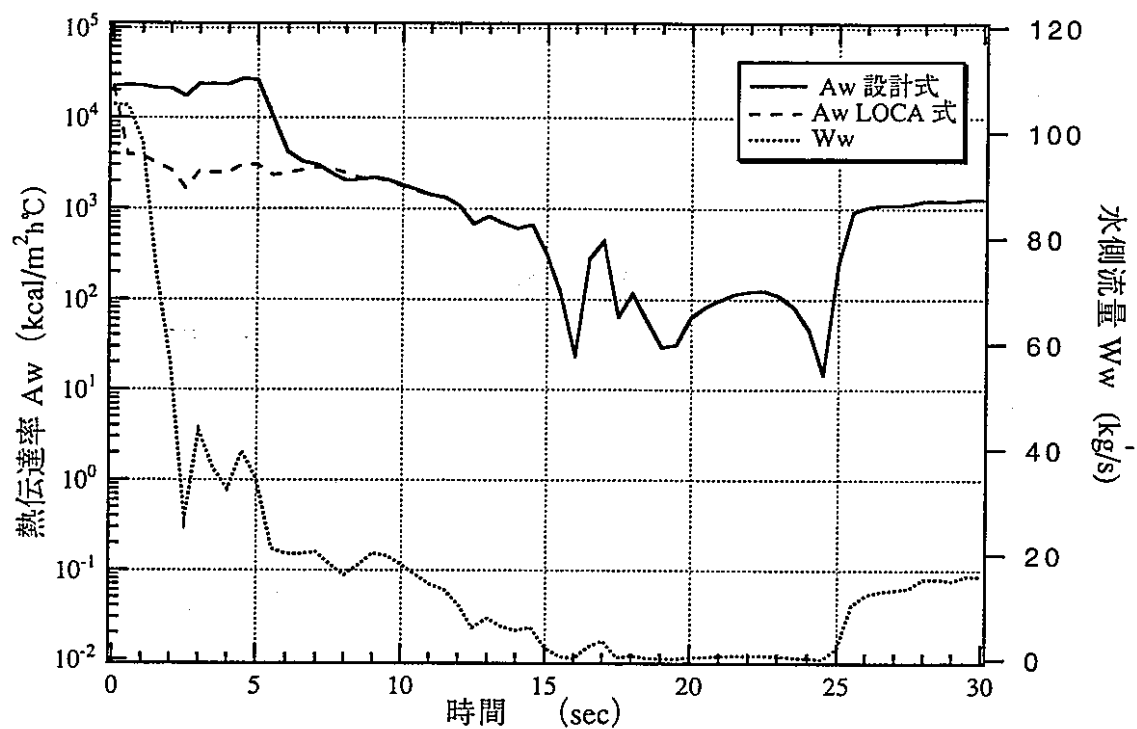


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

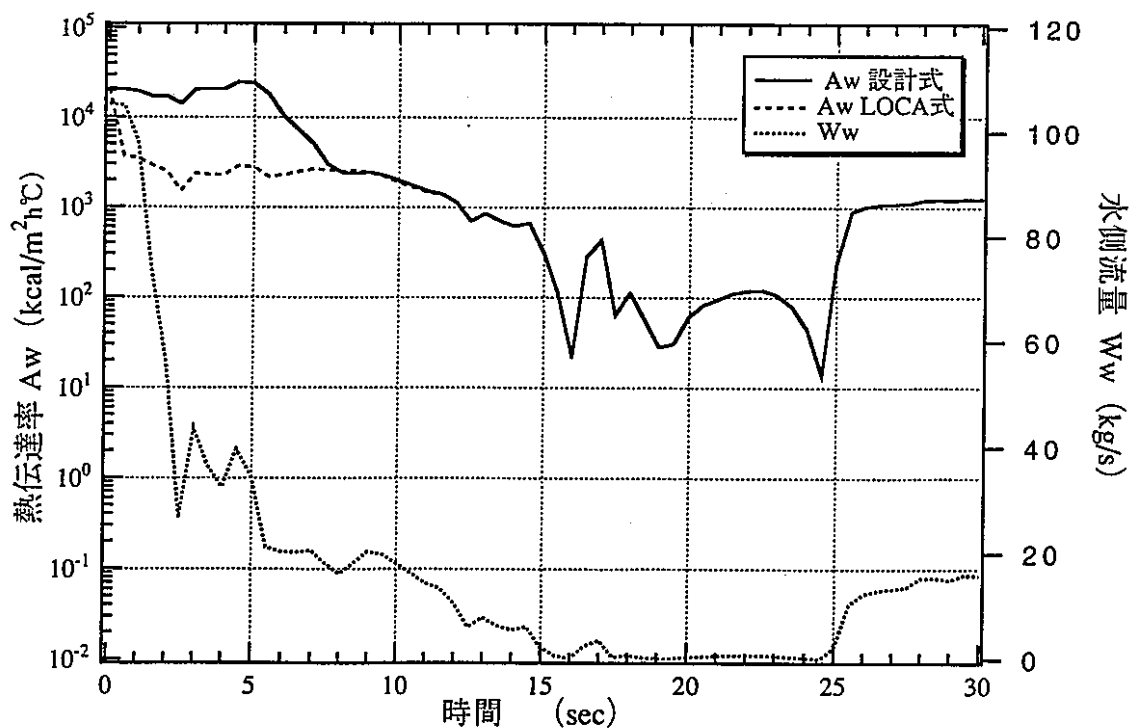


ケース1J (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (メッシュ番号18)

図 - 水側熱伝達率と流量 (EVリンク 8)

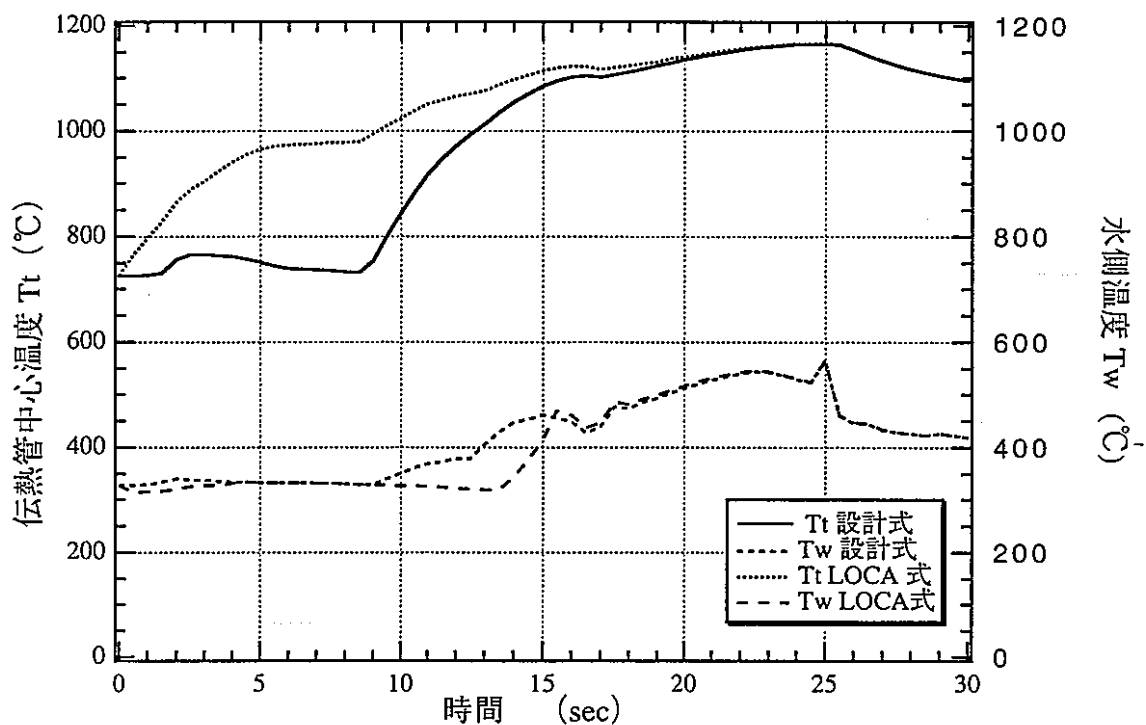


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

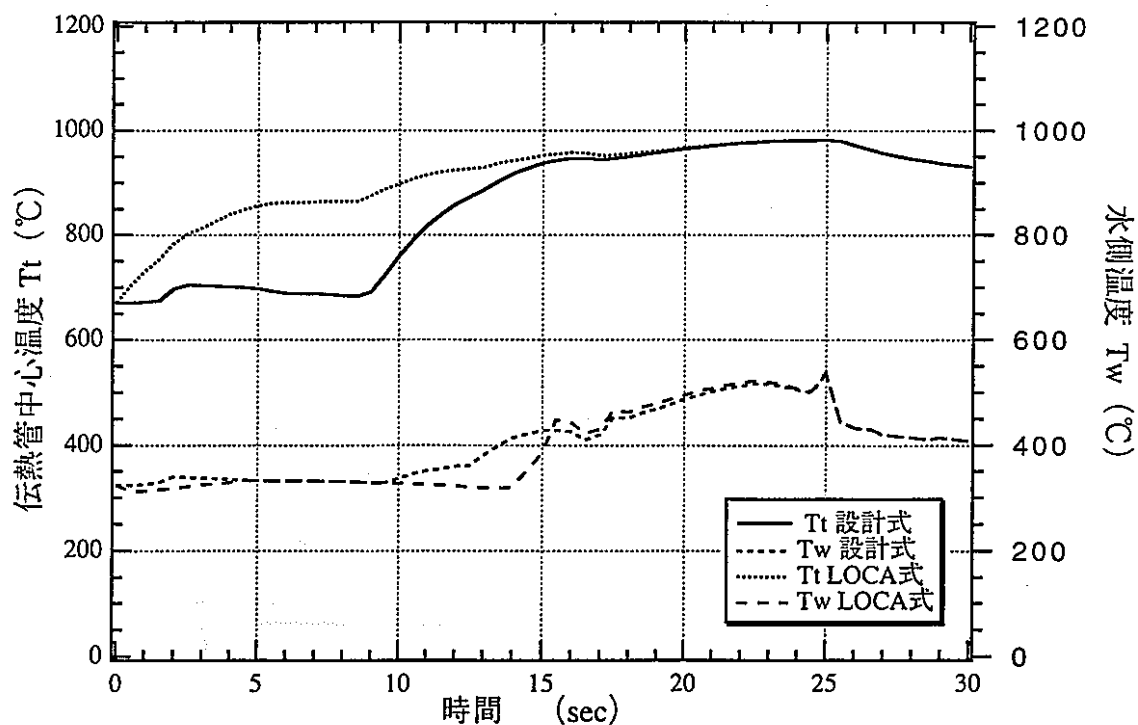


ケース1J (EV入口弁3B、EV出口弁4B) (メッシュ番号18)

図 - 水側熱伝達率と流量 (EVリンク9)

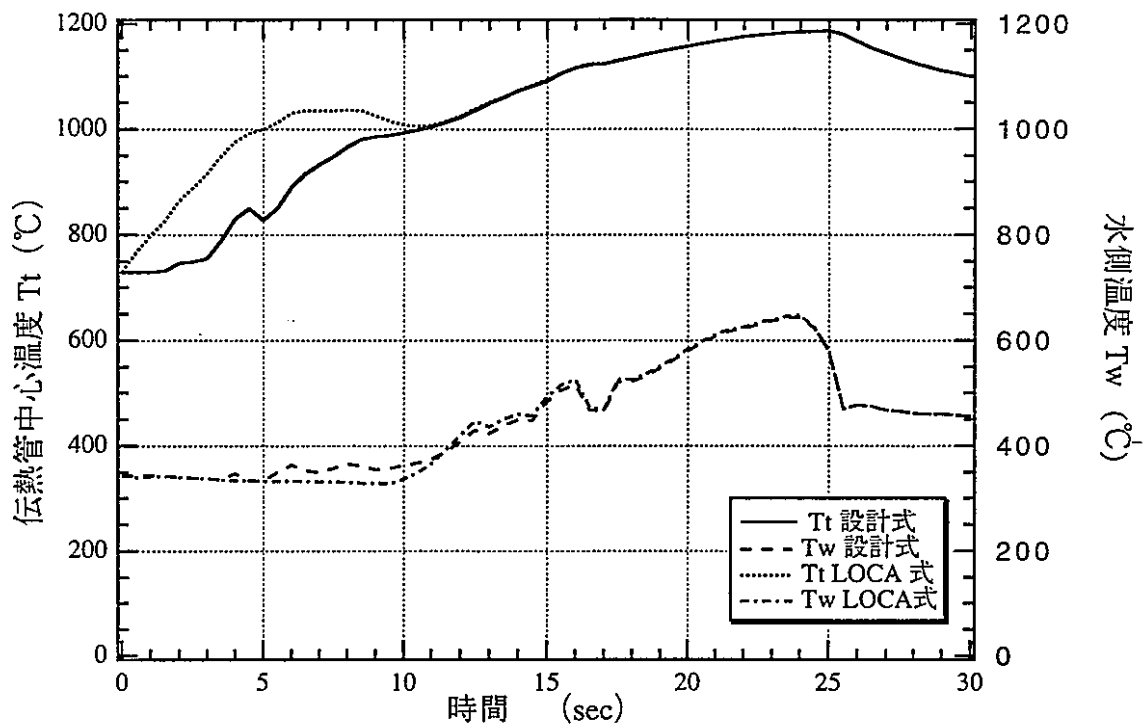


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

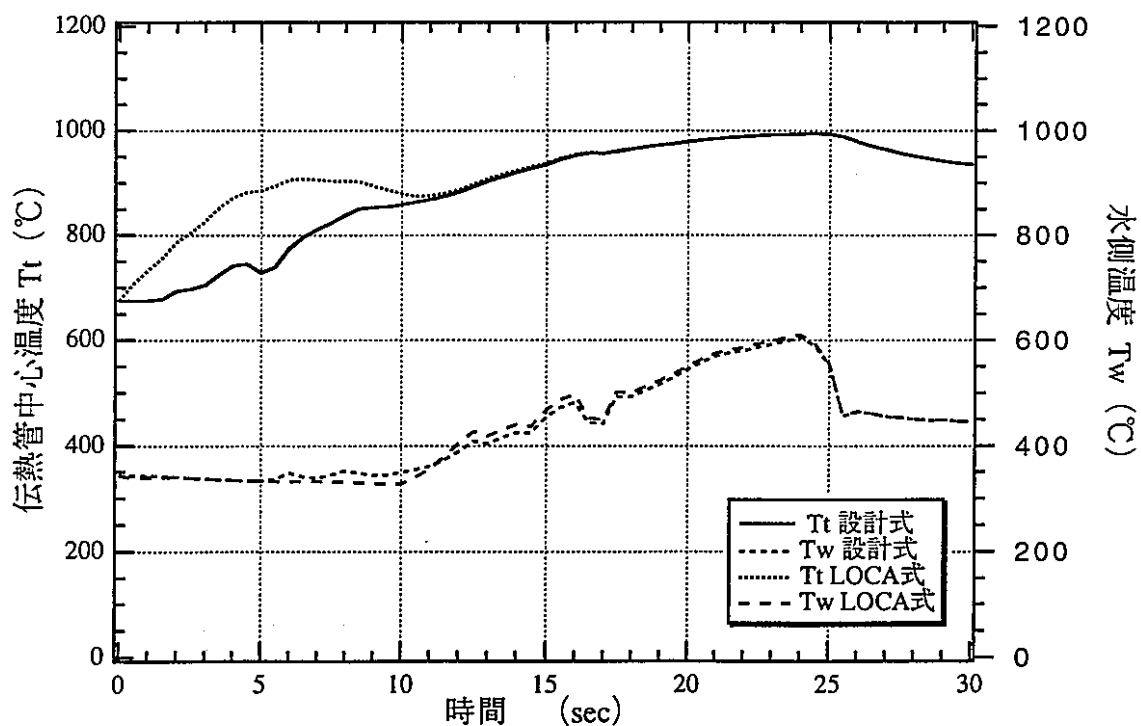


ケース1J (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (メッシュ番号20)

図 - 伝熱管中心温度と水側温度 (EVリンク 6)

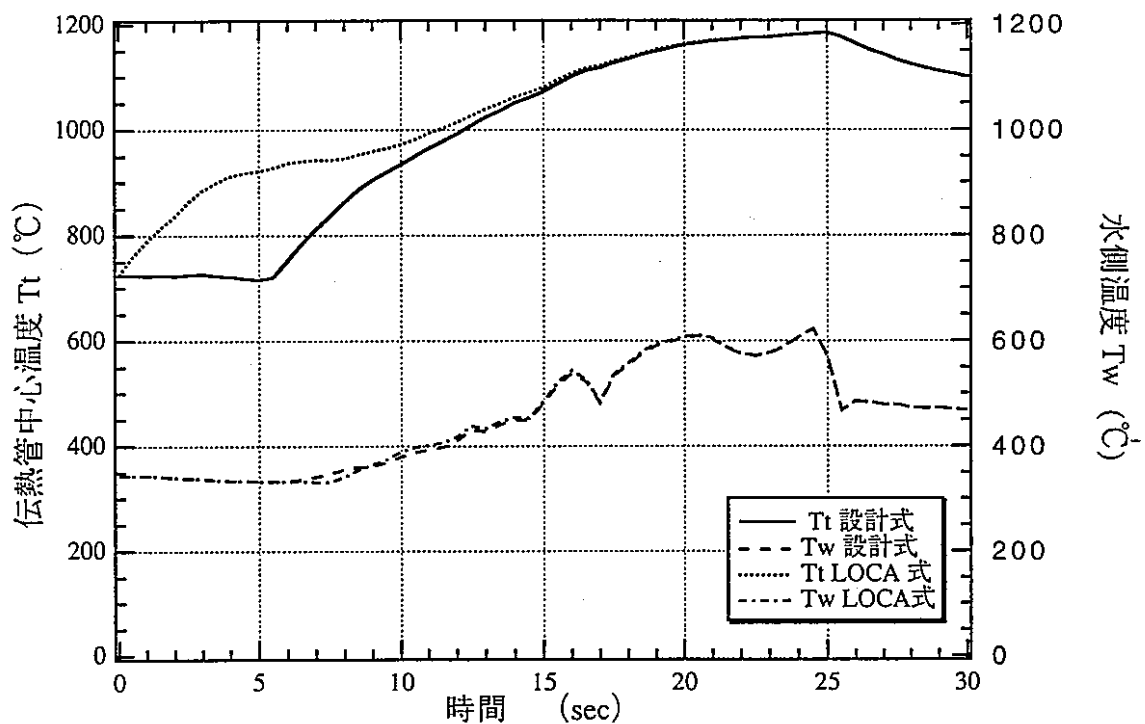


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

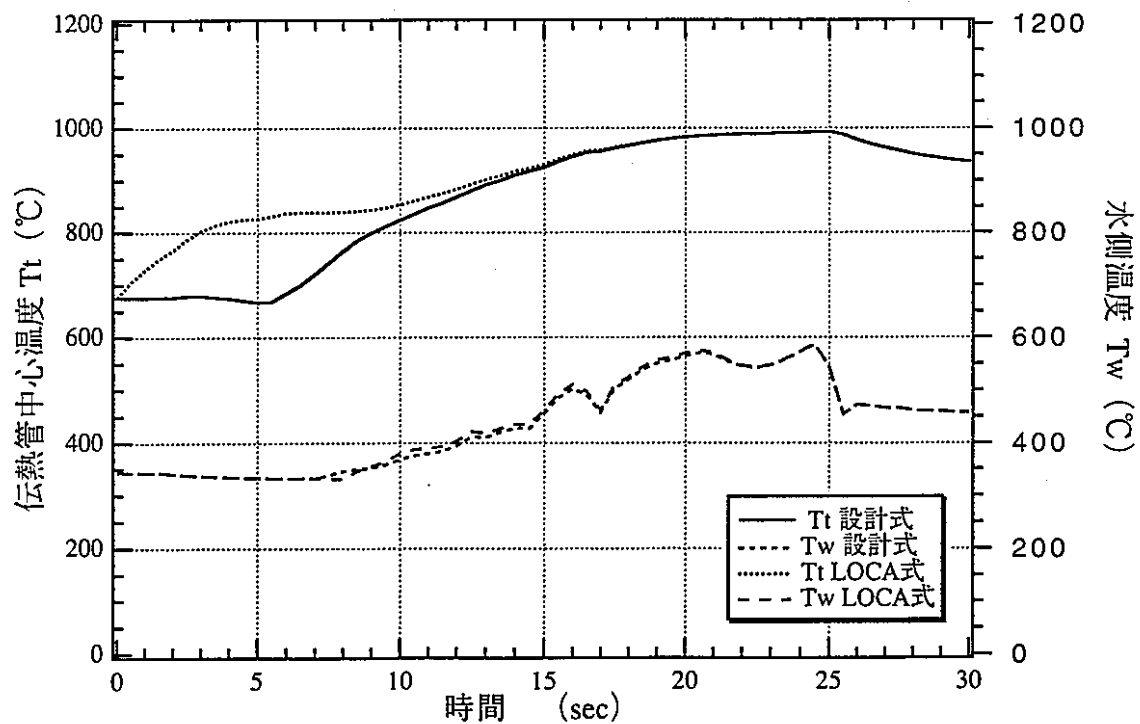


ケース1J (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (メッシュ番号20)

図 - 伝熱管中心温度と水側温度 (EVリンク 8)

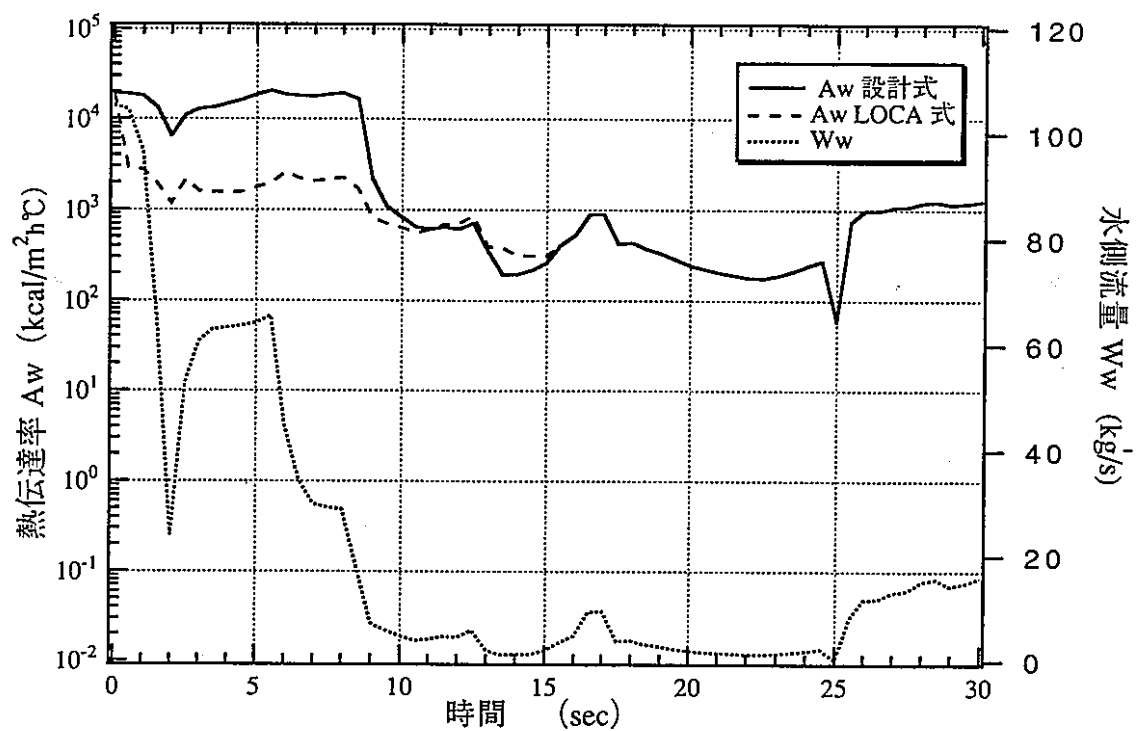


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

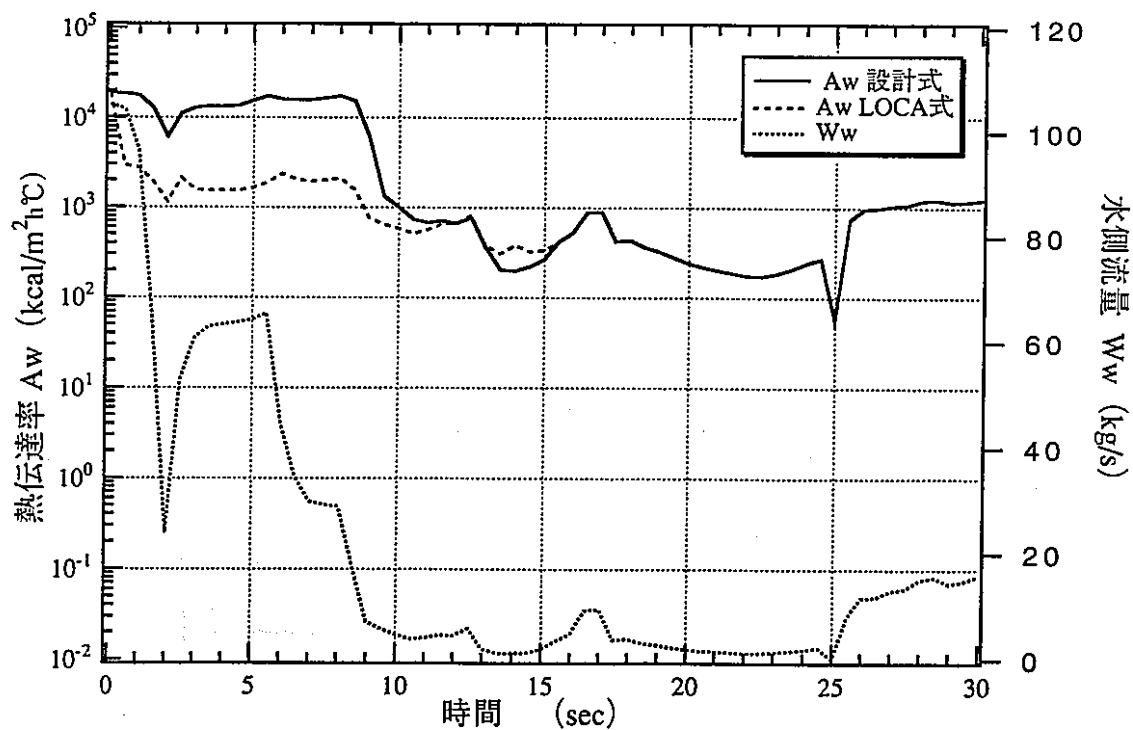


ケース1J (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (メッシュ番号20)

図 - 伝熱管中心温度と水側温度 (EVリンク 9)

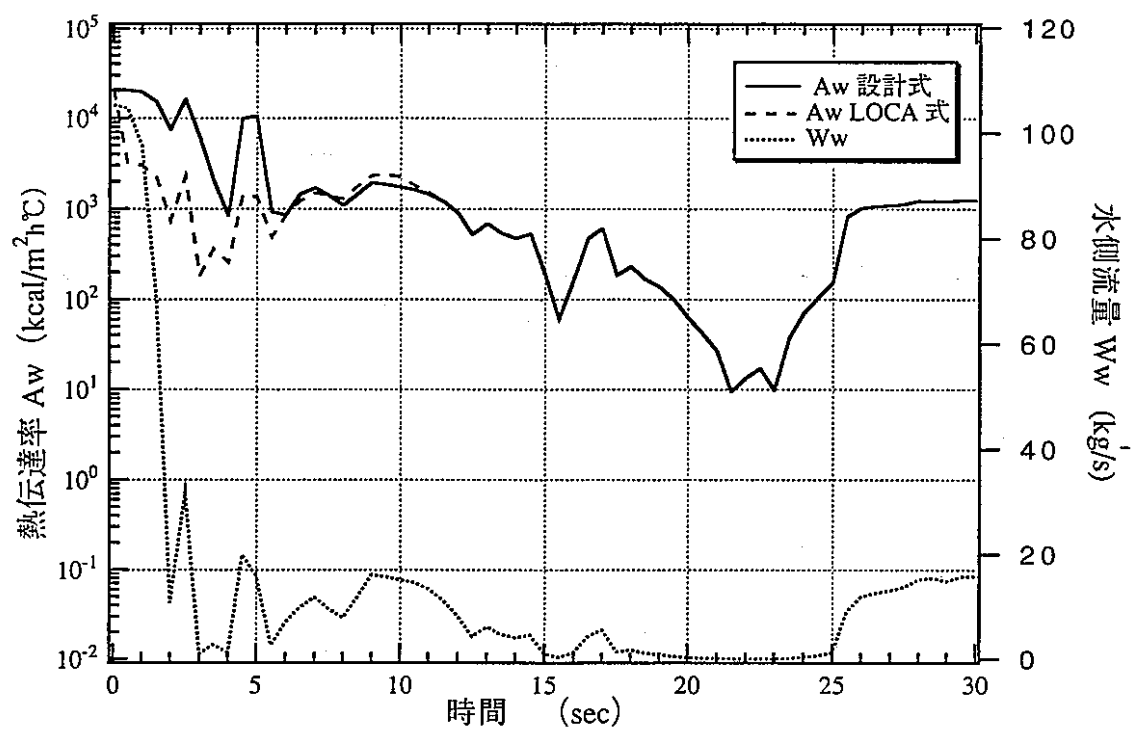


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

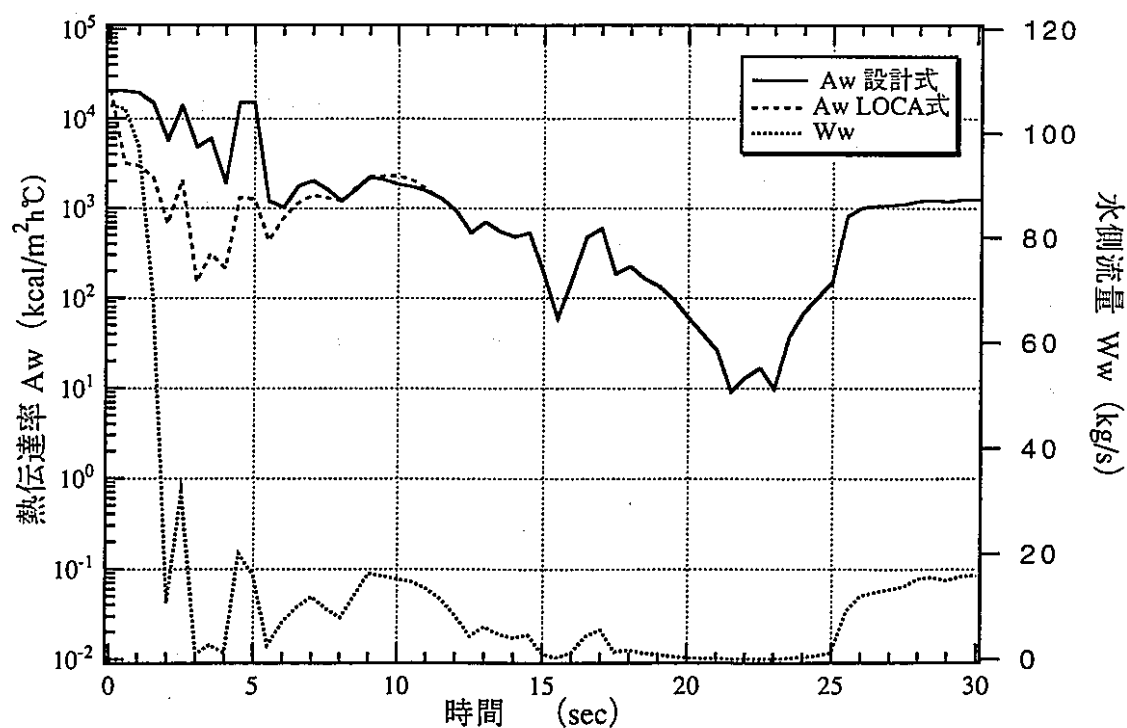


ケース1J (EV入口弁3B、EV出口弁 4B) (メッシュ番号20)

図 - 水側熱伝達率と流量 (EVリンク 6)

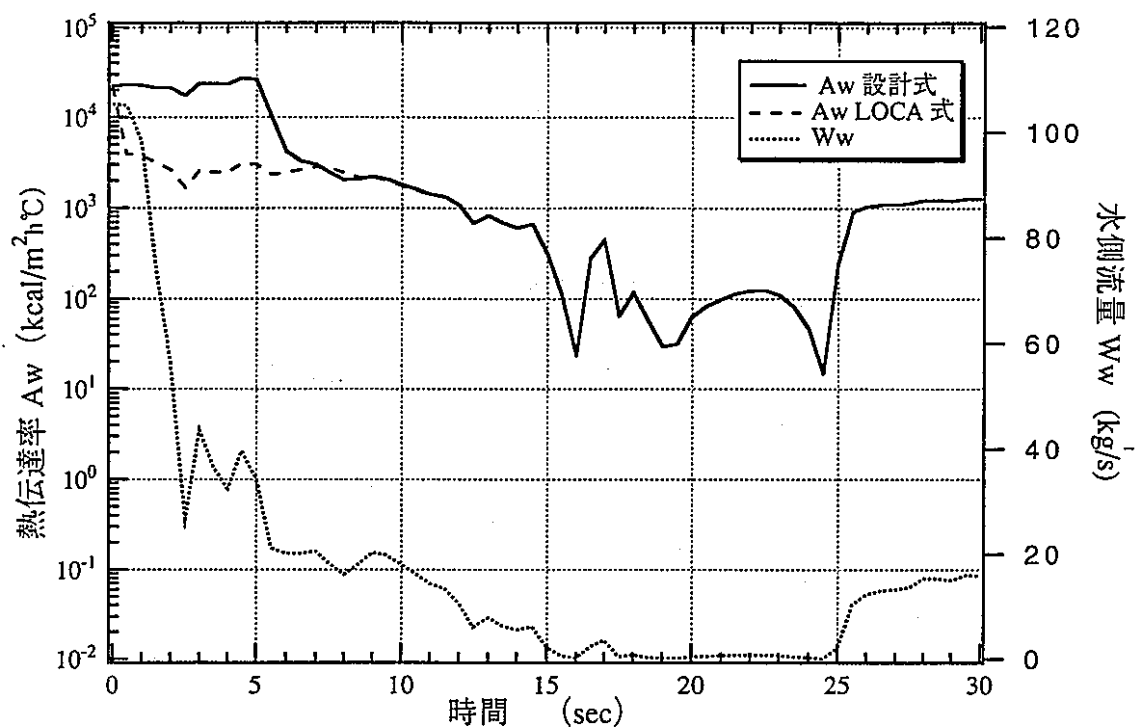


ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

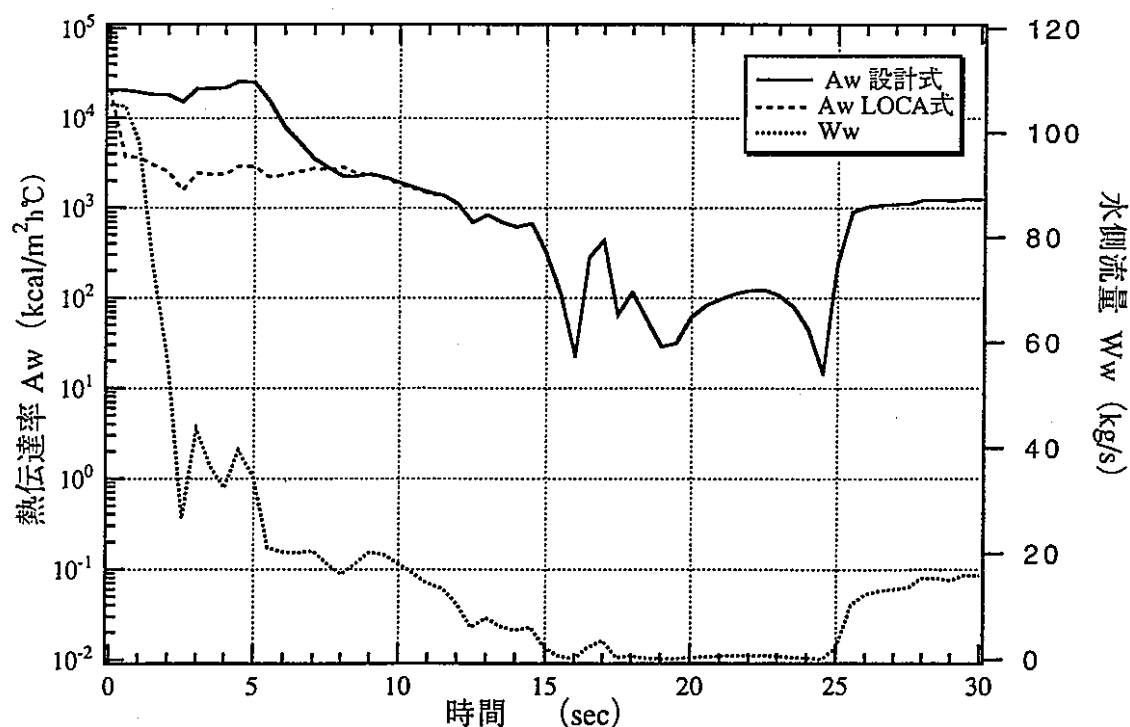


ケース1J (EV入口弁3B、EV出口弁4B) (メッシュ番号20)

図 - 水側熱伝達率と流量 (EVリンク8)



ケース1A (EV入口弁3B、EV出口弁4B)



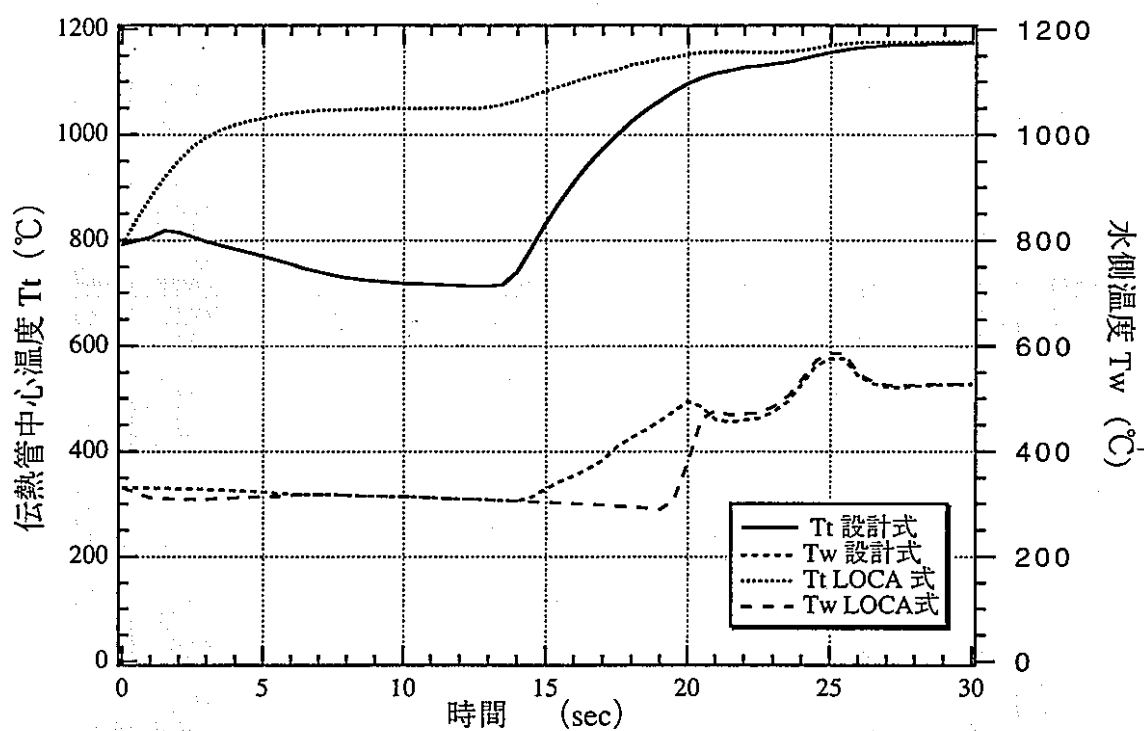
ケース1J (EV入口弁3B、EV出口弁4B) (メッシュ番号20)

図 - 水側熱伝達率と流量 (EVリンク9)

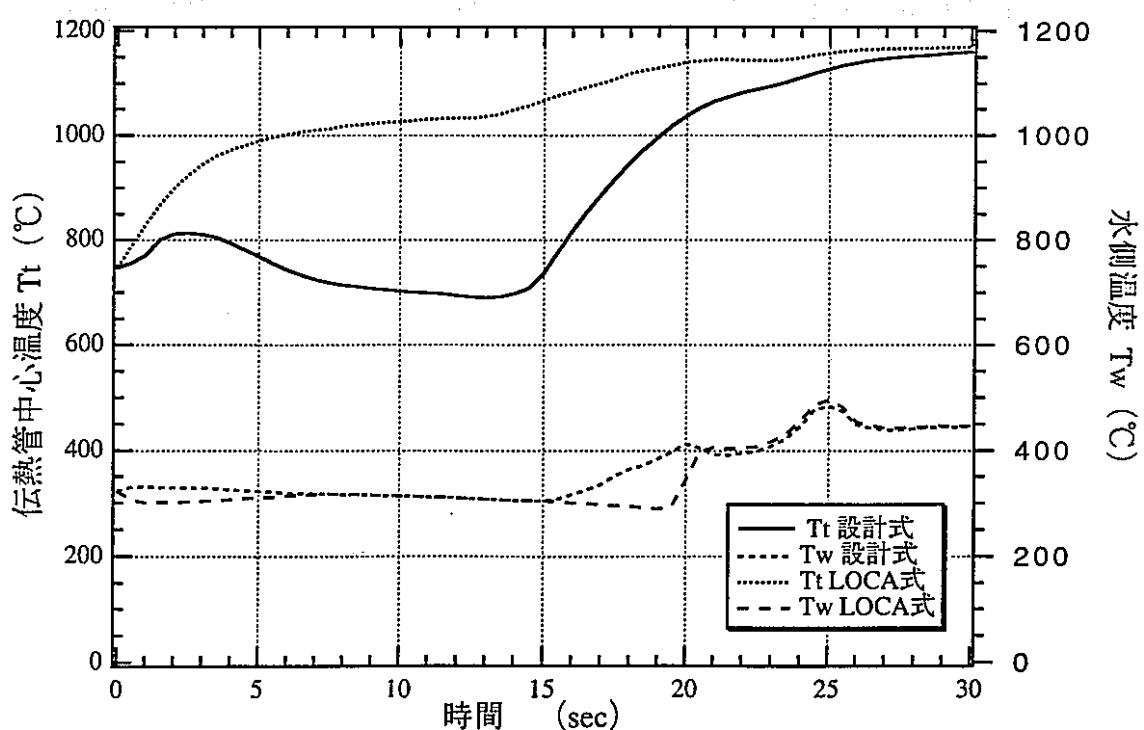


表 MjSGブロー解析ポスト処理(RUPIN)解析ケース

| 解析ケース名 | ブロー解析条件 |       | 反応条件サーバイパラメータ |                                 |          | 水側熱伝達式 | 出力  |
|--------|---------|-------|---------------|---------------------------------|----------|--------|-----|
|        | EV入口弁   | EV出口弁 | 反応温度(℃)       | 反応域熱伝達率(kcal/m <sup>2</sup> h℃) | 反応域長さ(m) |        |     |
| 1-A(1) | 3B      | 4B    | 1200          | 6000                            | 0.5      | 設計式    | 定格  |
| 1-A(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-B(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 定格  |
| 1-B(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-C(1) | 同上      | 同上    | 1100          | 8600                            | 0.5      | 設計式    | 定格  |
| 1-C(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-D(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 定格  |
| 1-D(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-E(1) | 同上      | 同上    | 1200          | 4500                            | 0.5      | 設計式    | 定格  |
| 1-E(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-F(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 定格  |
| 1-F(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-G(1) | 同上      | 同上    | 1100          | 6700                            | 0.5      | 設計式    | 定格  |
| 1-G(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-H(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 定格  |
| 1-H(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-I(1) | 同上      | 同上    | 1200~1000     | 4500~10000                      | 0.5      | 設計式    | 定格  |
| 1-I(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-J(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 3500~8600                       | 同上       | 設計式    | 定格  |
| 1-J(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 6-A(1) | 同上      | 同上    | 1200          | 6000                            | 0.5      | 設計式    | 40% |
| 6-A(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 40% |
| 6-B(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 40% |
| 6-B(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 40% |
| 6-C(1) | 同上      | 同上    | 1100          | 8600                            | 0.5      | 設計式    | 40% |
| 6-C(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 40% |
| 6-D(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 40% |
| 6-D(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 40% |
| 6-I(1) | 同上      | 同上    | 1200~1000     | 4500~10000                      | 0.5      | 設計式    | 40% |
| 6-I(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 40% |
| 6-J(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 3500~8600                       | 同上       | 設計式    | 40% |
| 6-J(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 40% |

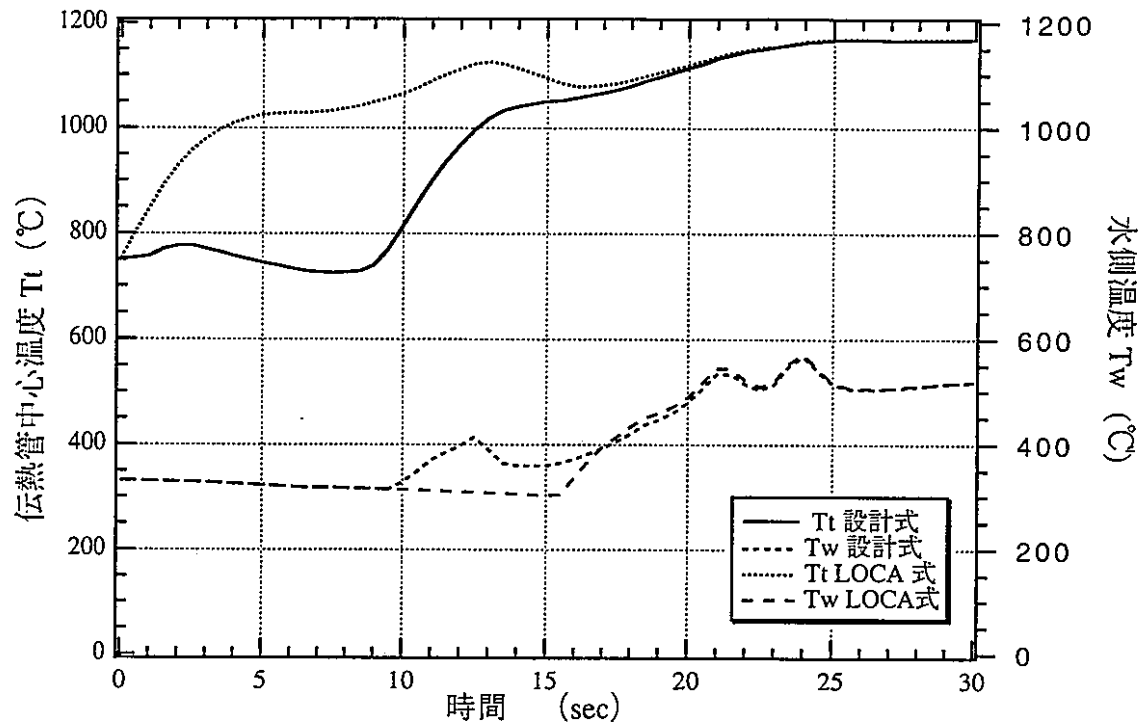


ケース6A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B、40%出力)

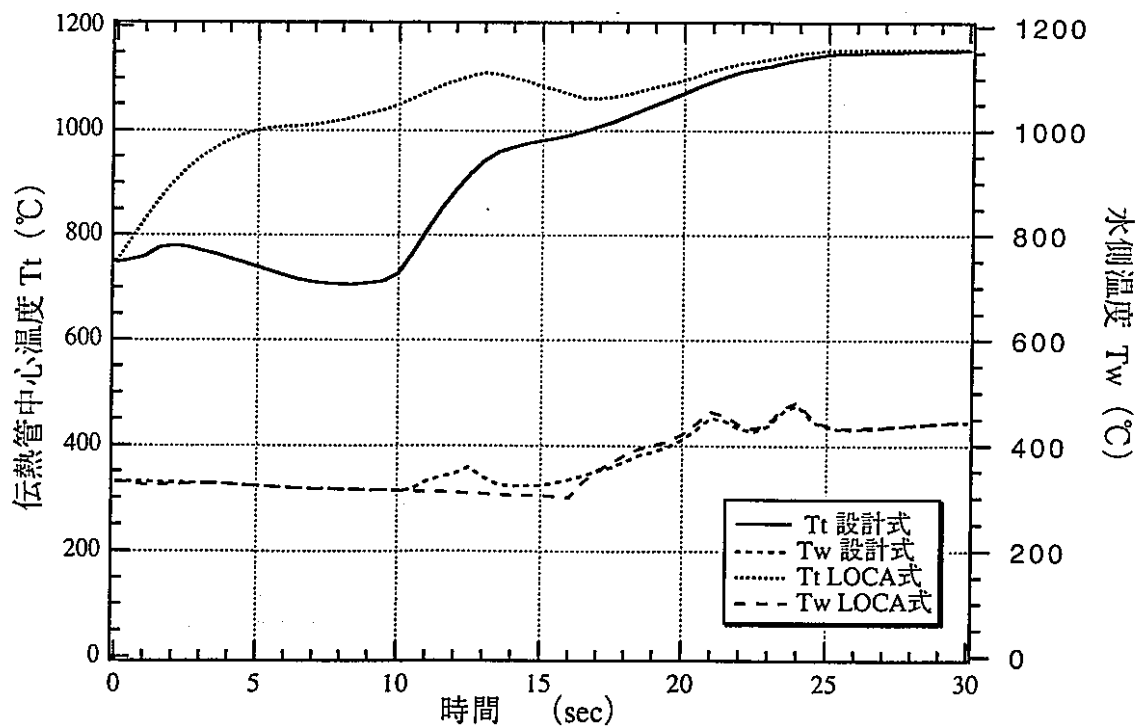


ケース6I (EV入口弁3B、EV出口弁 4B、40%出力) (メッシュ番号14)

図 - 伝熱管中心温度と水側温度 (EVリンク 6)

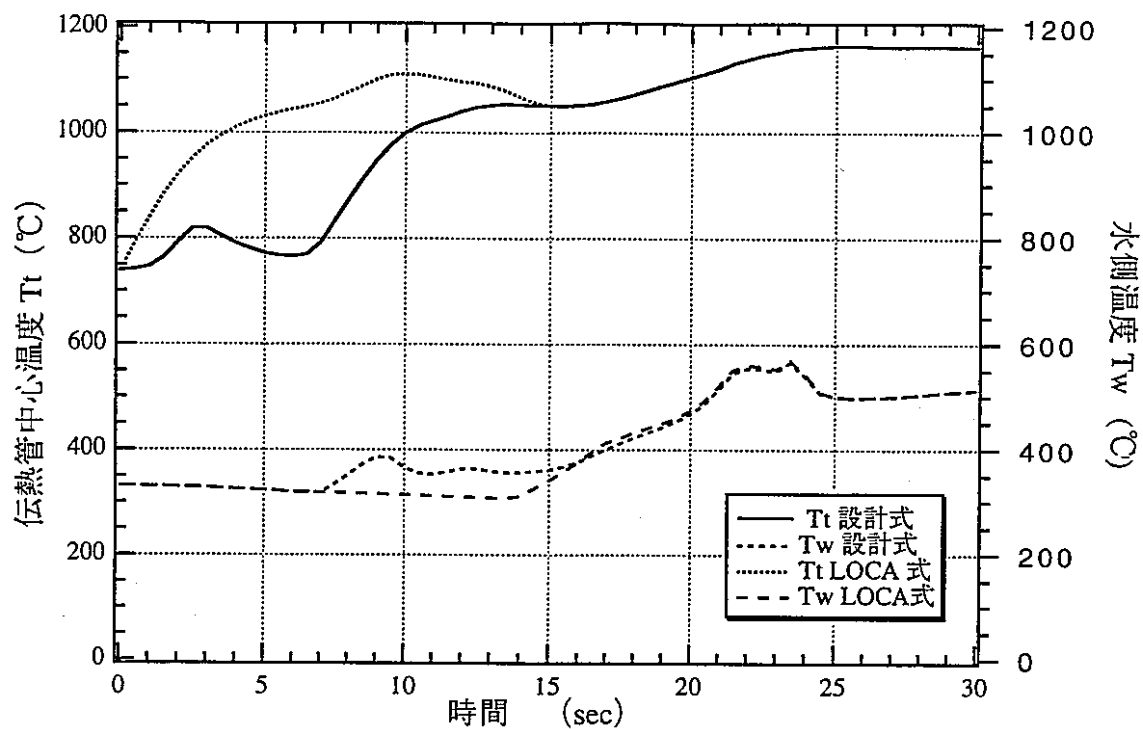


ケース6A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B、40%出力)

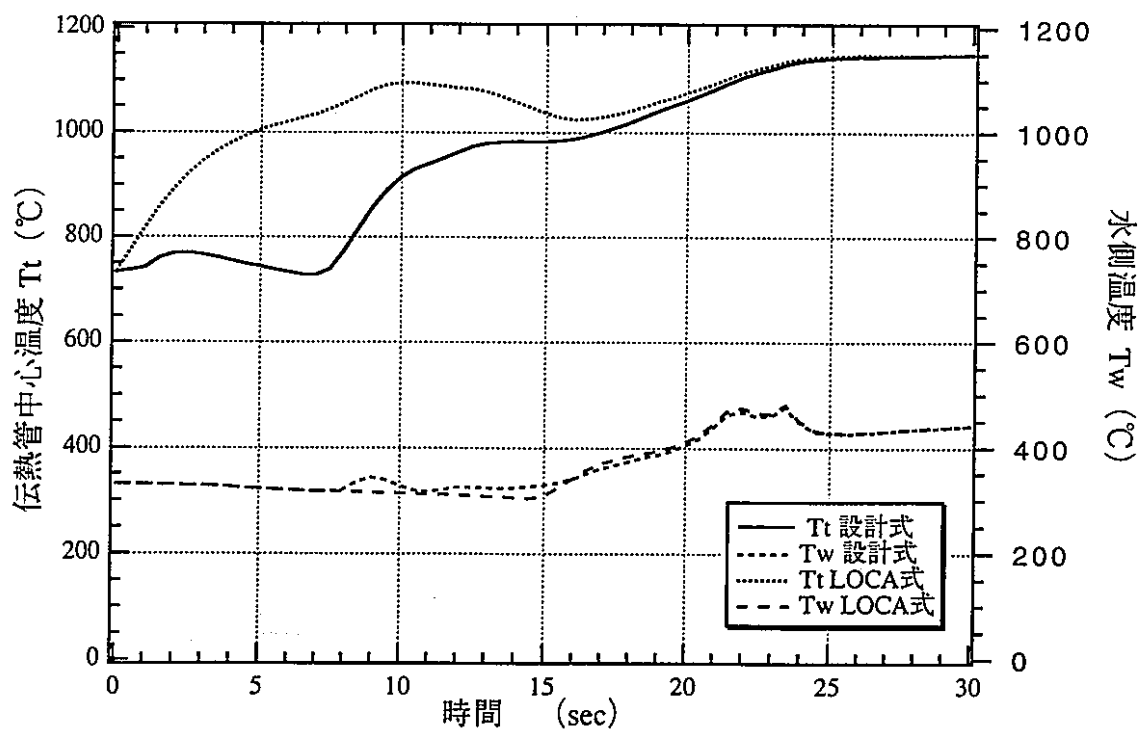


ケース6I (EV入口弁3B、EV出口弁 4B、40%出力) (メッシュ番号14)

図 - 伝熱管中心温度と水側温度 (EVリンク 8)

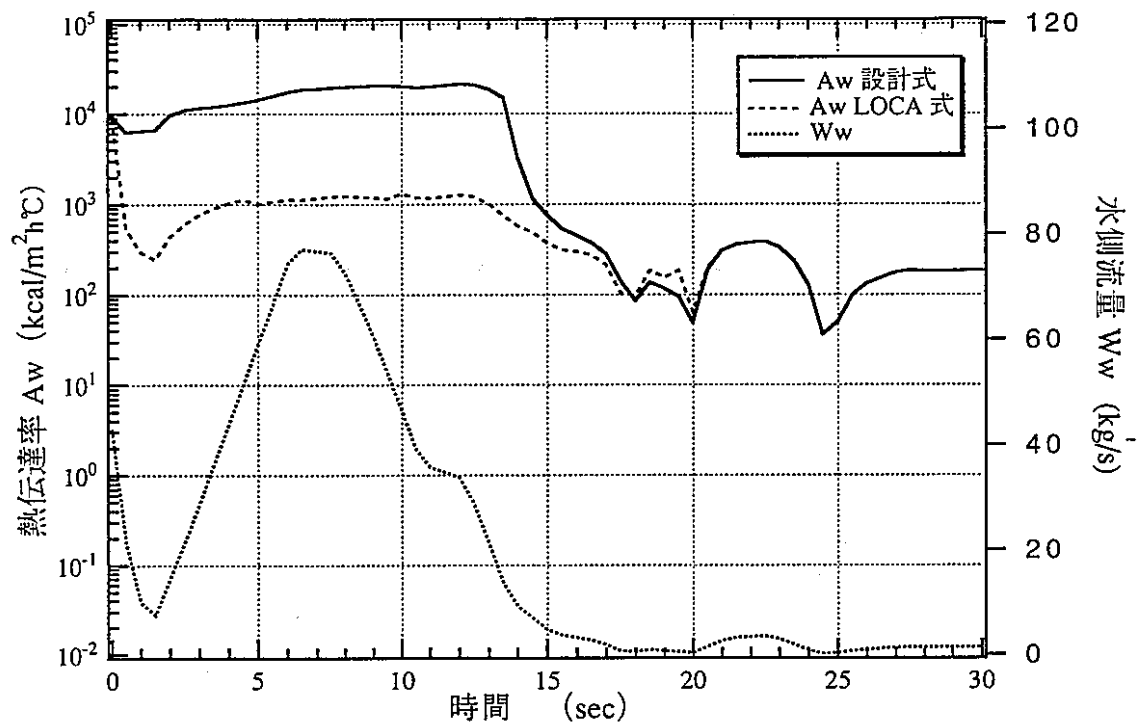


ケース6A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B、40%出力)

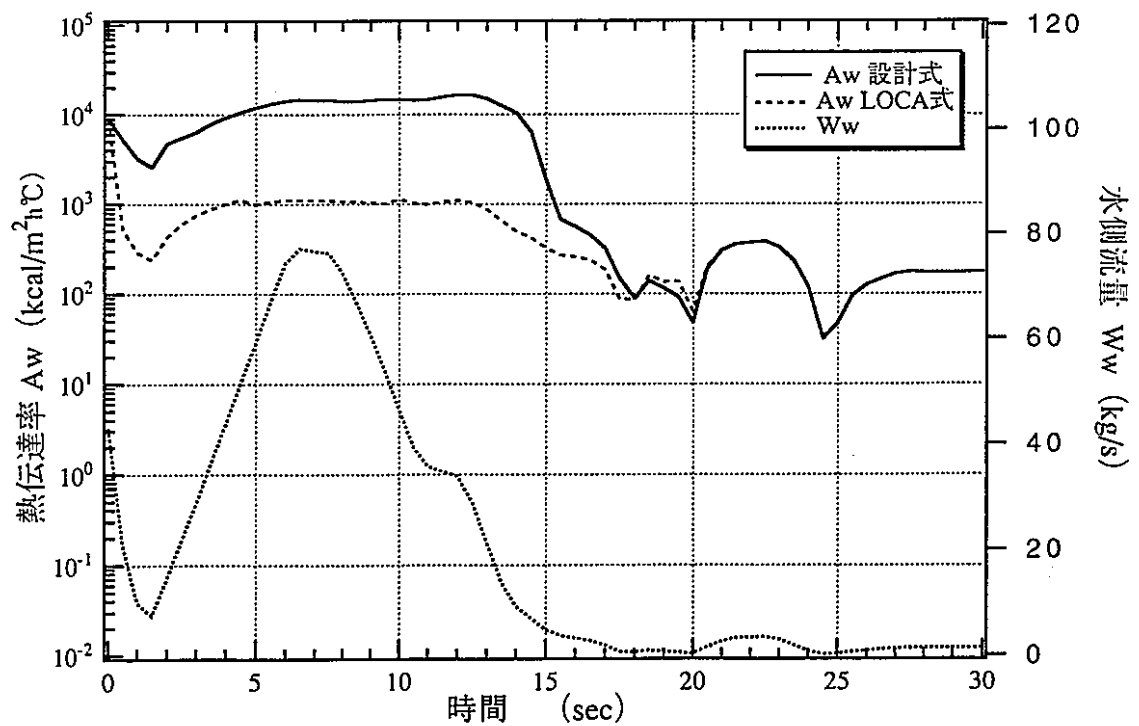


ケース6I (EV入口弁3B、EV出口弁 4B、40%出力) (メッシュ番号14)

図 - 伝熱管中心温度と水側温度 (EVリンク9)

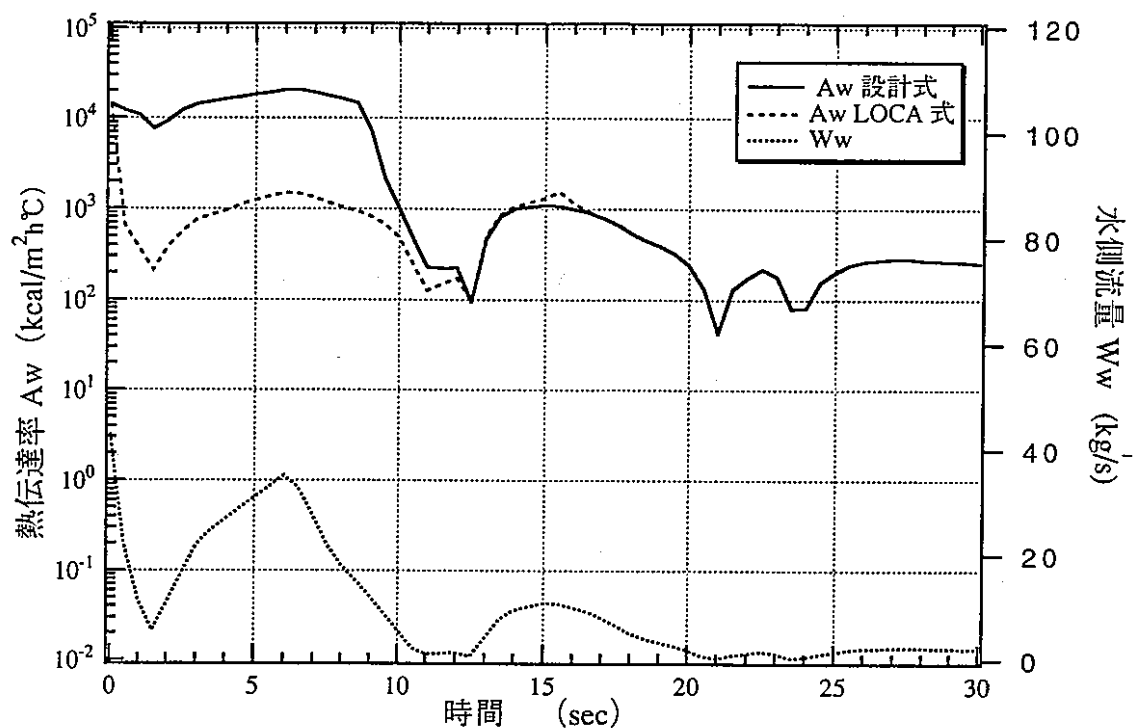


ケース6A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B、40%出力)

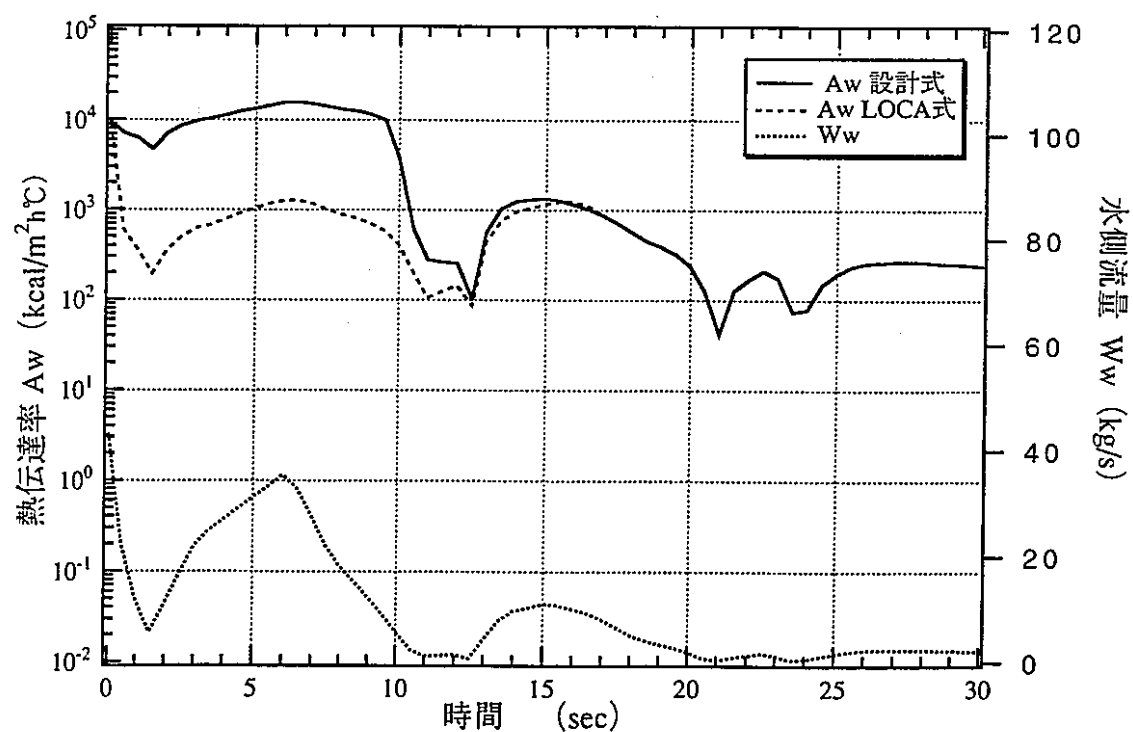


ケース6I (EV入口弁3B、EV出口弁 4B、40%出力) (メッシュ番号14)

図 - 水側熱伝達率と流量 (EVリンク6)

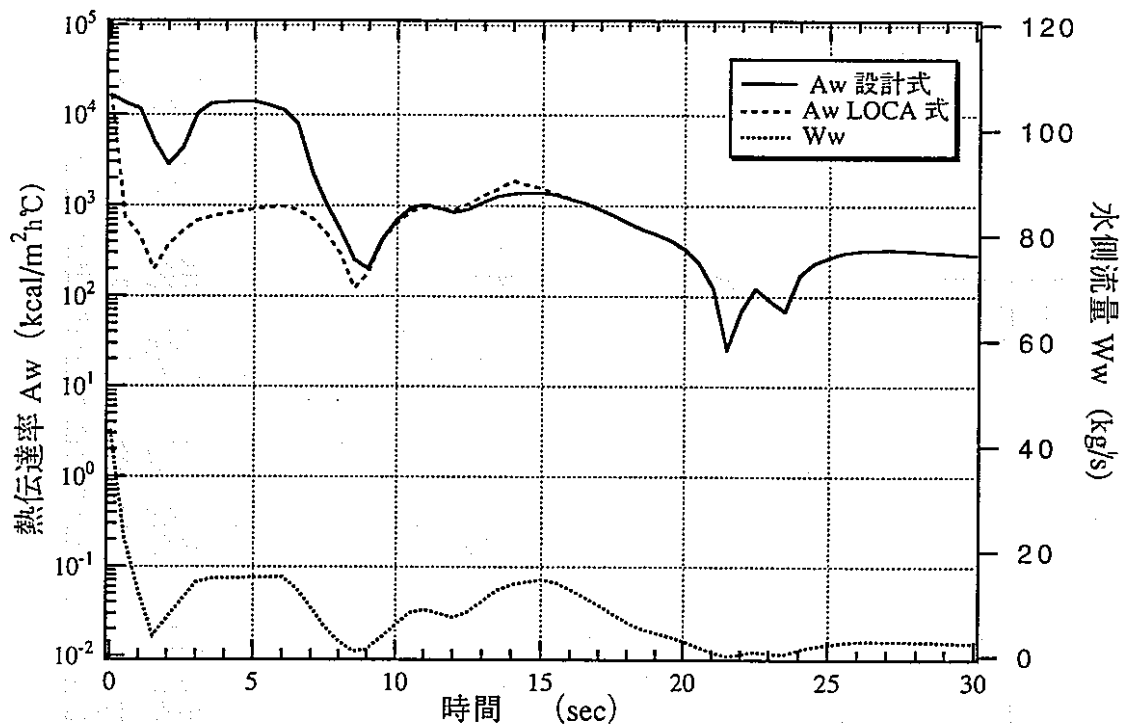


ケース6A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B、40%出力)

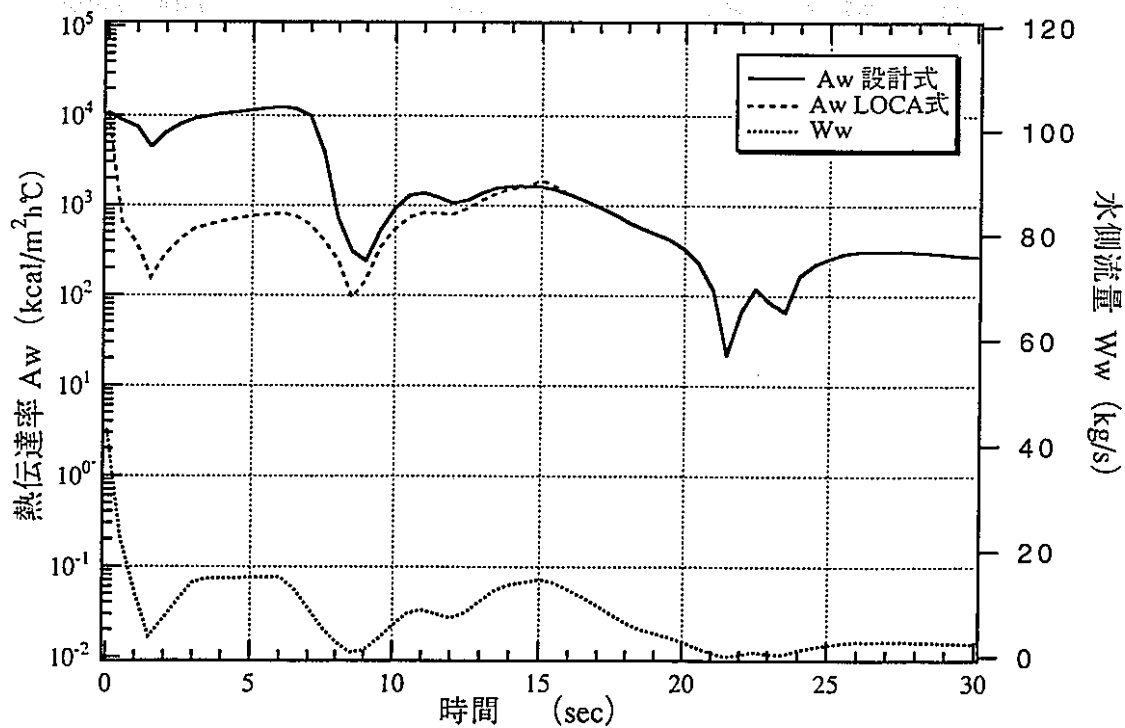


ケース6I (EV入口弁3B、EV出口弁 4B、40%出力) (メッシュ番号14)

図 - 水側熱伝達率と流量 (EVリンク 8)



ケース6A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B、40%出力)



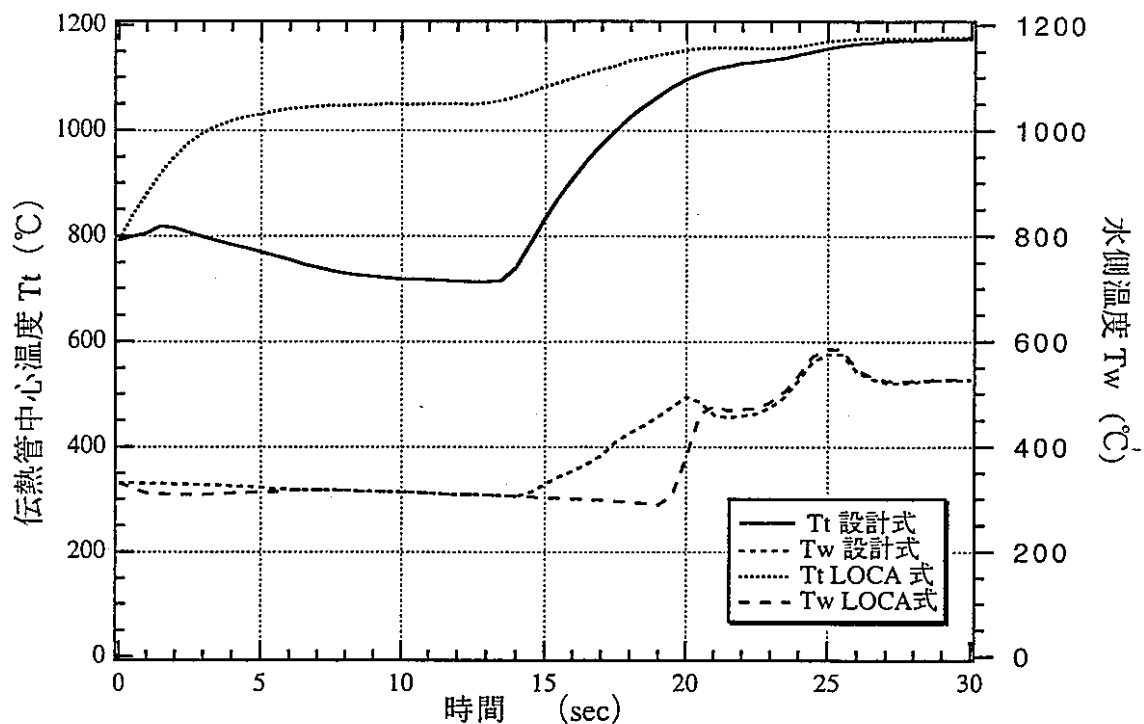
ケース6I (EV入口弁3B、EV出口弁 4B、40%出力) (メッシュ番号14)

図 - 水側熱伝達率と流量 (EVリンク9)

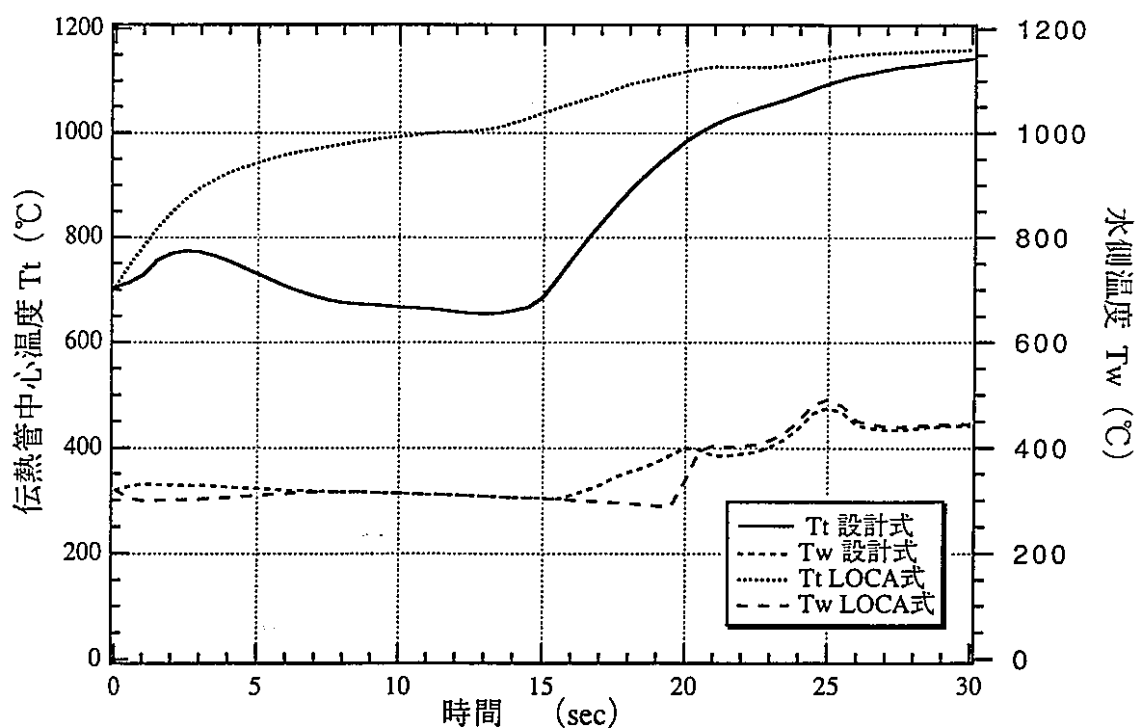
表 MJSGブロー解析ポスト処理(RUPIN)解析ケース

| 解析ケース名 | ブロー解析条件 |       | 反応条件サーベイパラメータ |                                 |          | 水側熱伝達式 | 出力  |
|--------|---------|-------|---------------|---------------------------------|----------|--------|-----|
|        | EV入口弁   | EV出口弁 | 反応温度(℃)       | 反応域熱伝達率(kcal/m <sup>2</sup> h℃) | 反応域長さ(m) |        |     |
| 1-A(1) | 3B      | 4B    | 1200          | 6000                            | 0.5      | 設計式    | 定格  |
| 1-A(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-B(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 定格  |
| 1-B(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-C(1) | 同上      | 同上    | 1100          | 8600                            | 0.5      | 設計式    | 定格  |
| 1-C(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-D(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 定格  |
| 1-D(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-E(1) | 同上      | 同上    | 1200          | 4500                            | 0.5      | 設計式    | 定格  |
| 1-E(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-F(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 定格  |
| 1-F(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-G(1) | 同上      | 同上    | 1100          | 6700                            | 0.5      | 設計式    | 定格  |
| 1-G(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-H(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 定格  |
| 1-H(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-I(1) | 同上      | 同上    | 1200~1000     | 4500~10000                      | 0.5      | 設計式    | 定格  |
| 1-I(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 1-J(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 3500~8600                       | 同上       | 設計式    | 定格  |
| 1-J(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 定格  |
| 6-A(1) | 同上      | 同上    | 1200          | 6000                            | 0.5      | 設計式    | 40% |
| 6-A(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 40% |
| 6-B(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 40% |
| 6-B(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 40% |
| 6-C(1) | 同上      | 同上    | 1100          | 8600                            | 0.5      | 設計式    | 40% |
| 6-C(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 40% |
| 6-D(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 1.3      | 設計式    | 40% |
| 6-D(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 40% |
| 6-I(1) | 同上      | 同上    | 1200~1000     | 4500~10000                      | 0.5      | 設計式    | 40% |
| 6-I(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 40% |
| 6-J(1) | 同上      | 同上    | 同上            | 3500~8600                       | 同上       | 設計式    | 40% |
| 6-J(2) | 同上      | 同上    | 同上            | 同上                              | 同上       | LOCAの式 | 40% |



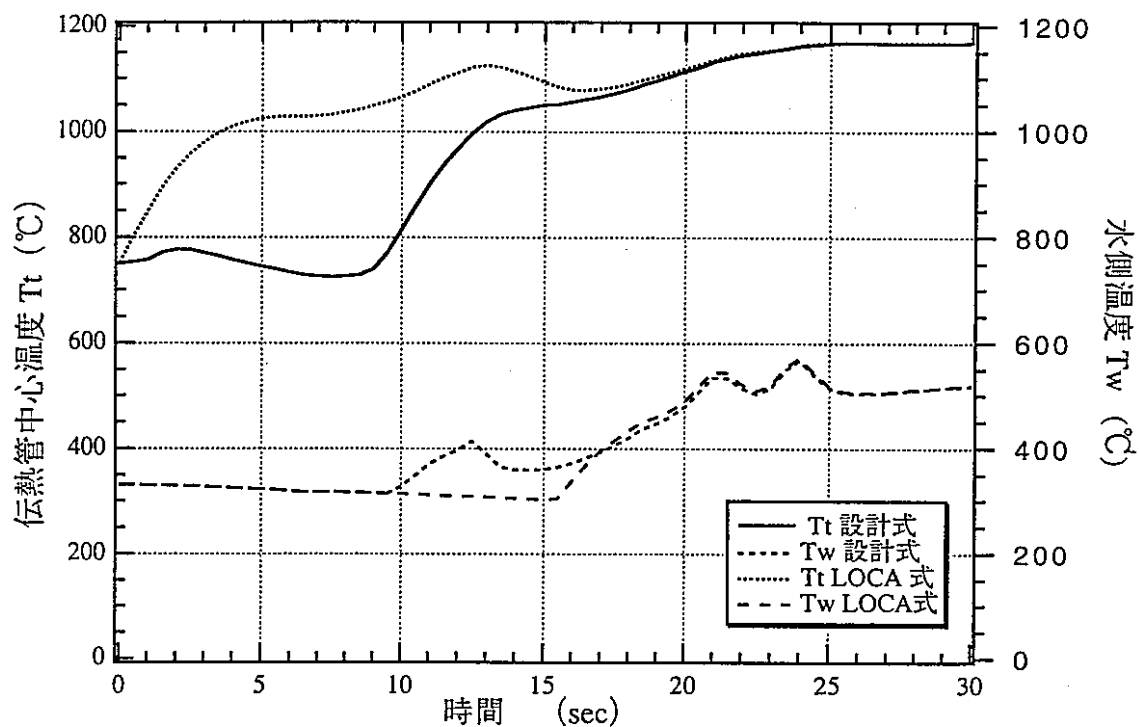


ケース6A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B、40%出力)

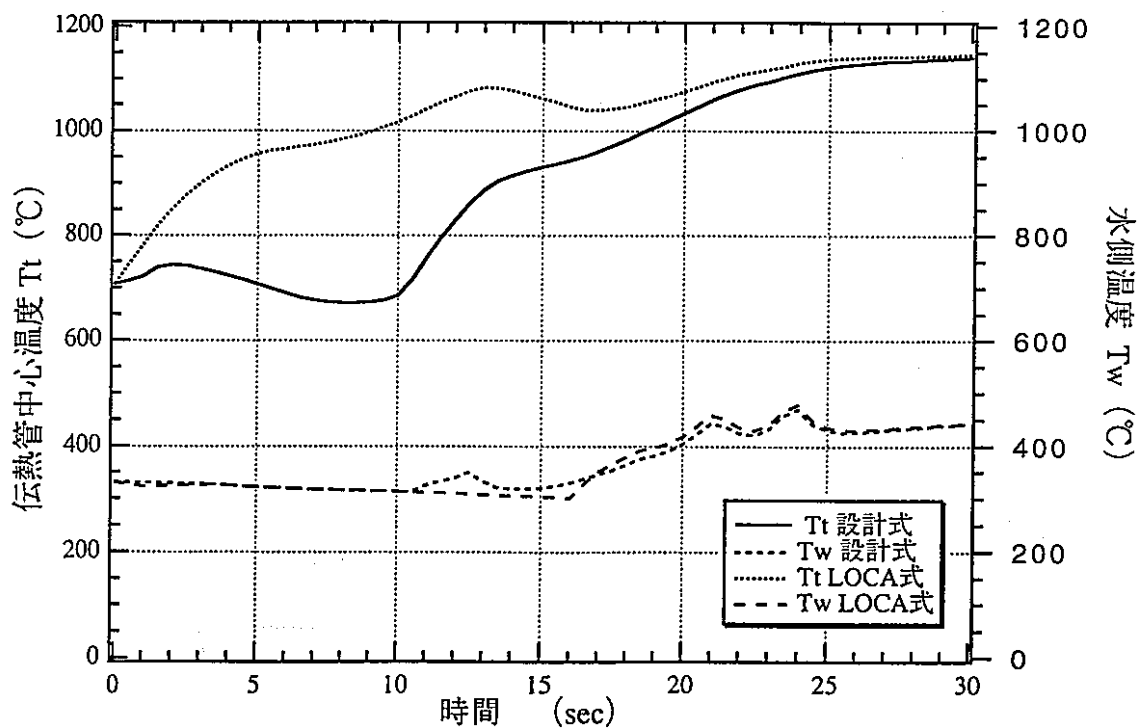


ケース6J (EV入口弁3B、EV出口弁 4B、40%出力) (メッシュ番号14)

図 - 伝熱管中心温度と水側温度 (EVリンク 6)

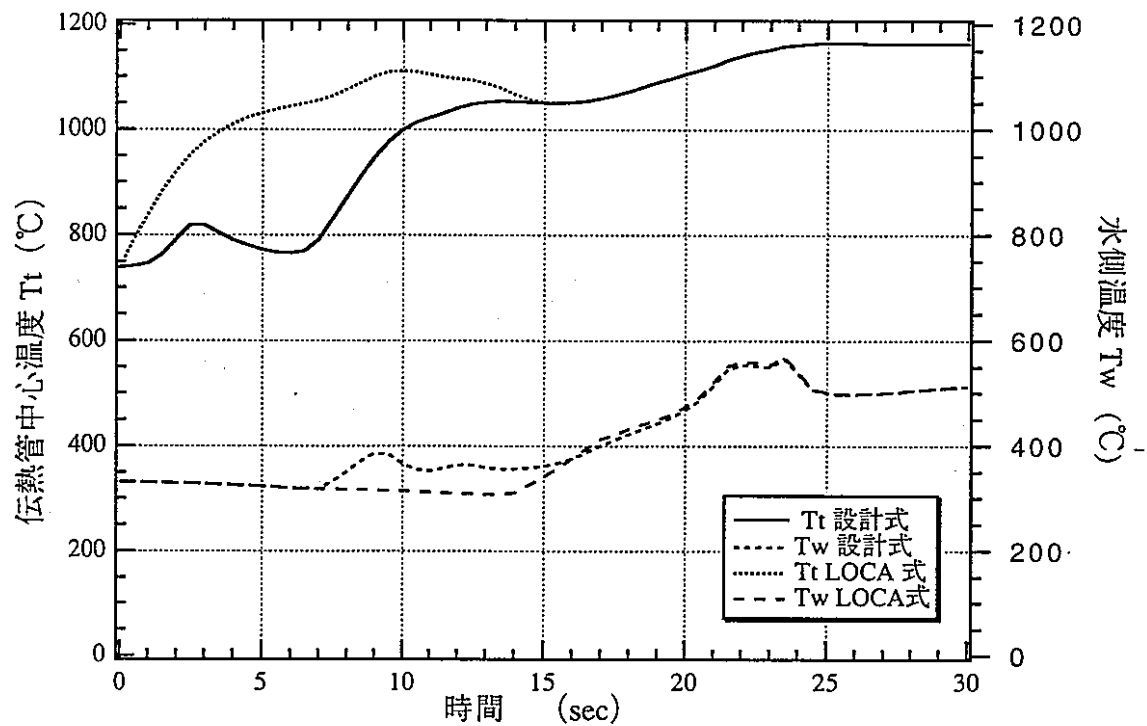


ケース6A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B、40%出力)。

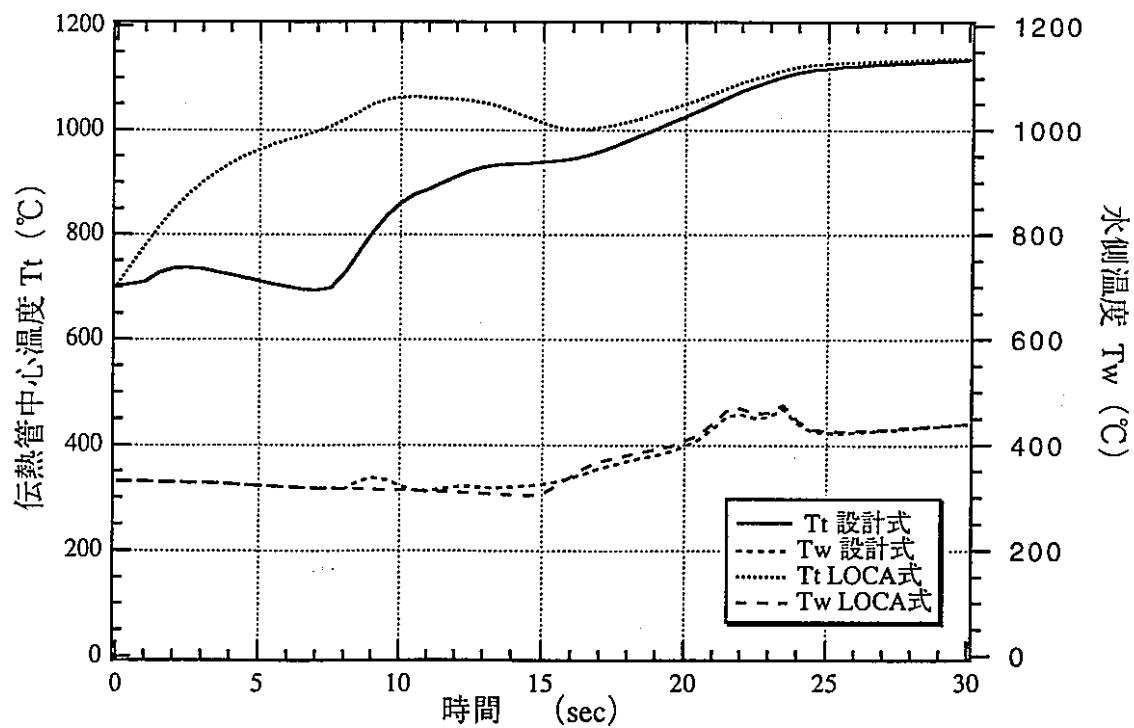


ケース6J (EV入口弁3B、EV出口弁 4B、40%出力) (メッシュ番号14)

図 - 伝熱管中心温度と水側温度 (EVリンク 8)

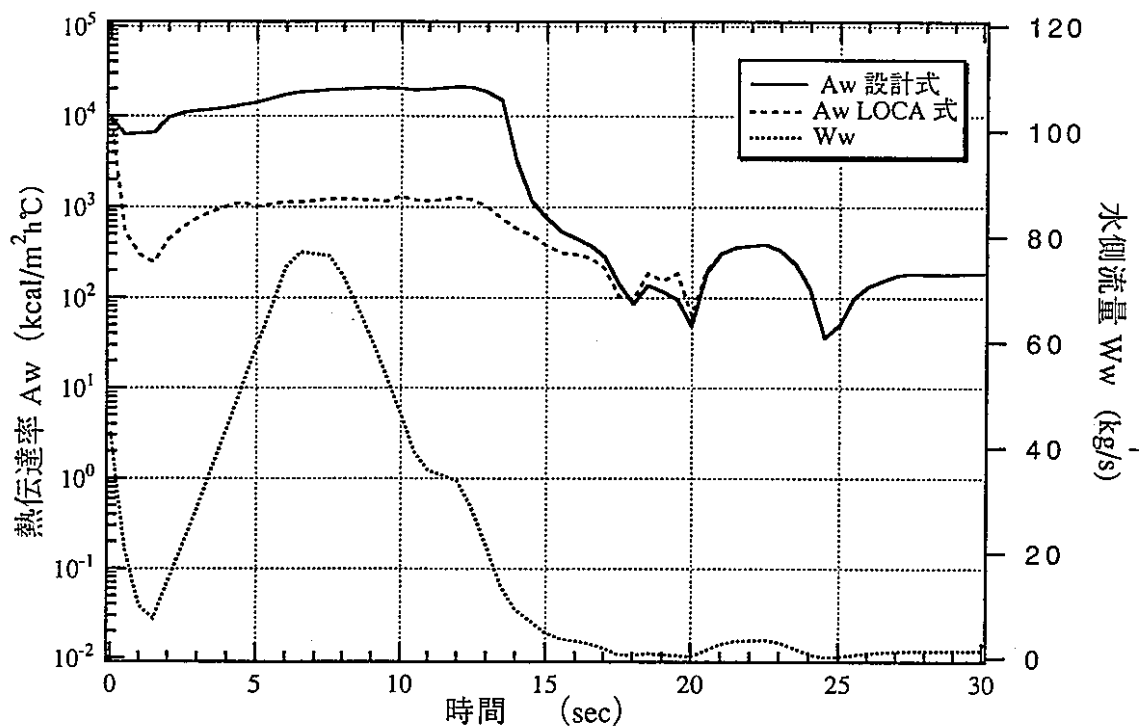


ケース6A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B、40%出力)

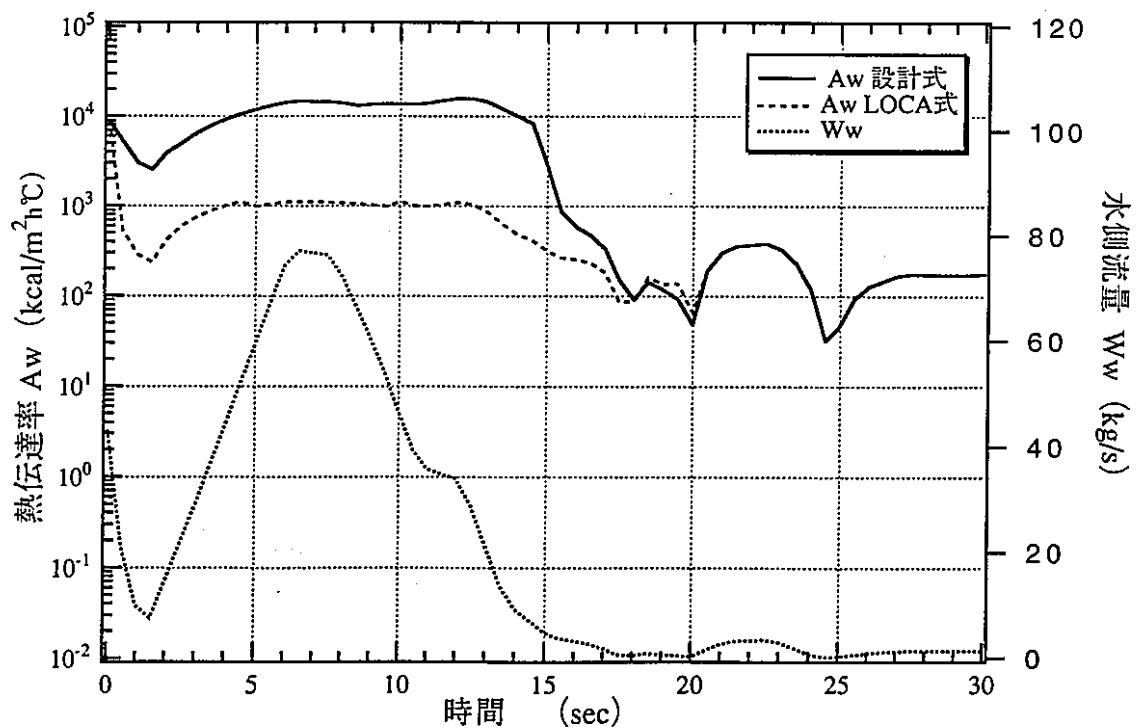


ケース6J (EV入口弁3B、EV出口弁 4B、40%出力) (メッシュ番号14)

図 - 伝熱管中心温度と水側温度 (EVリンク9)

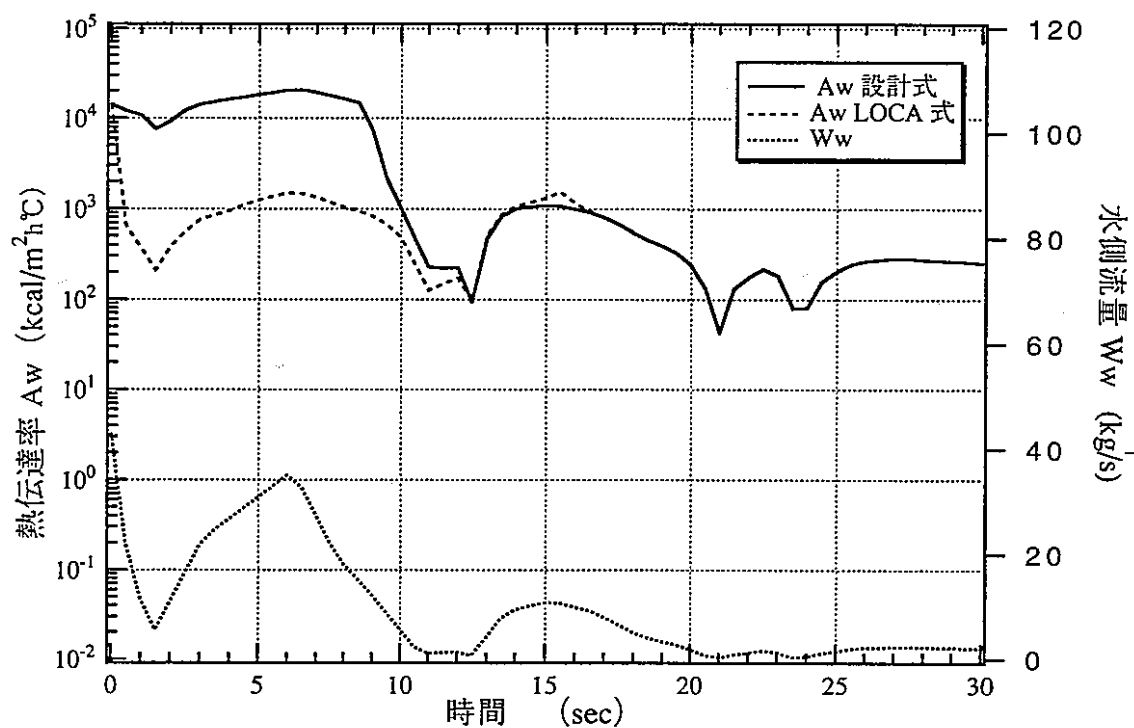


ケース6A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B、40%出力)

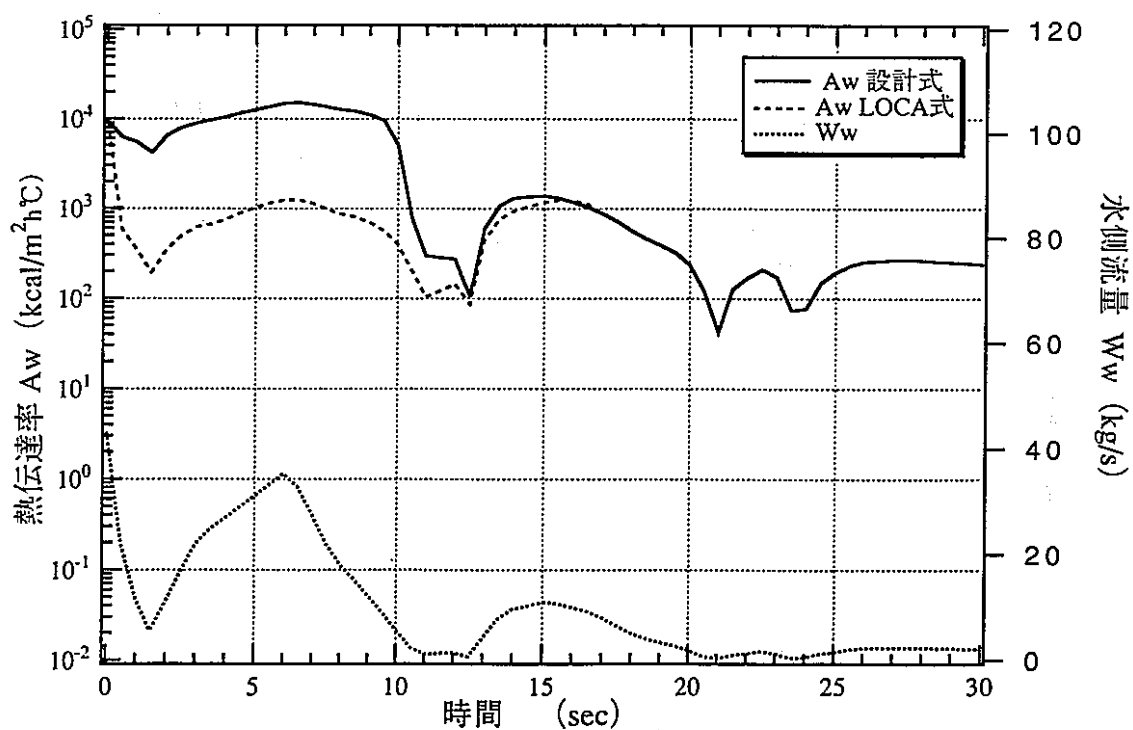


ケース6J (EV入口弁3B、EV出口弁 4B、40%出力) (メッシュ番号14)

図 - 水側熱伝達率と流量 (EVリンク6)

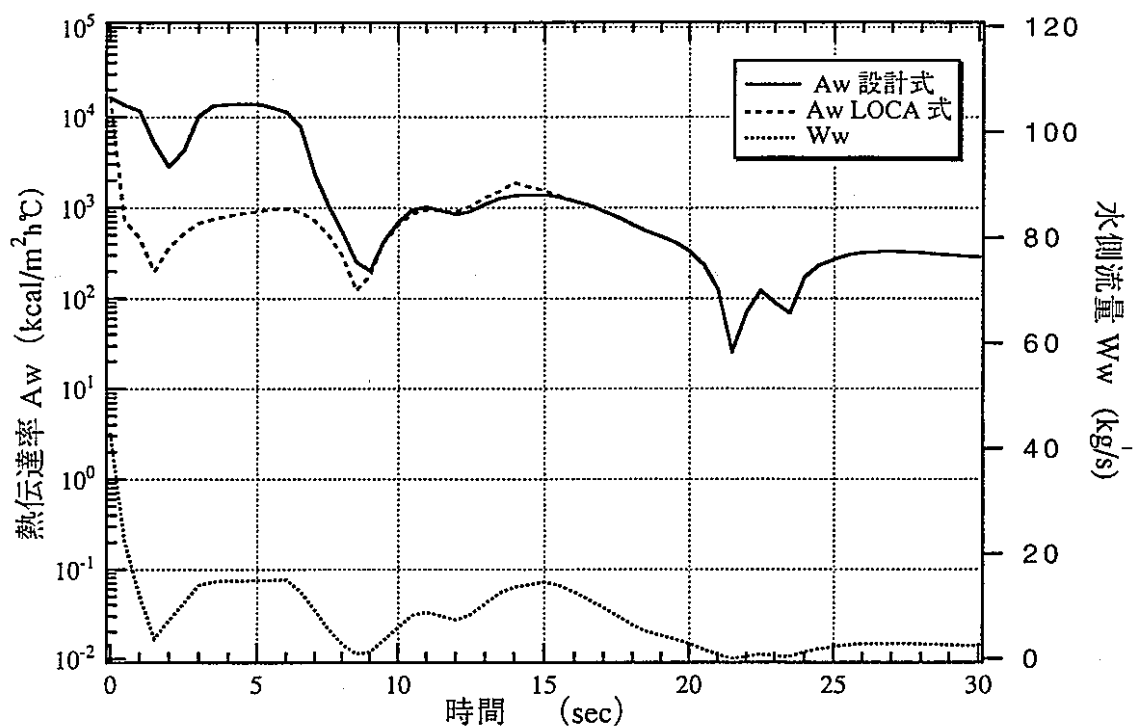


ケース6A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B、40%出力)

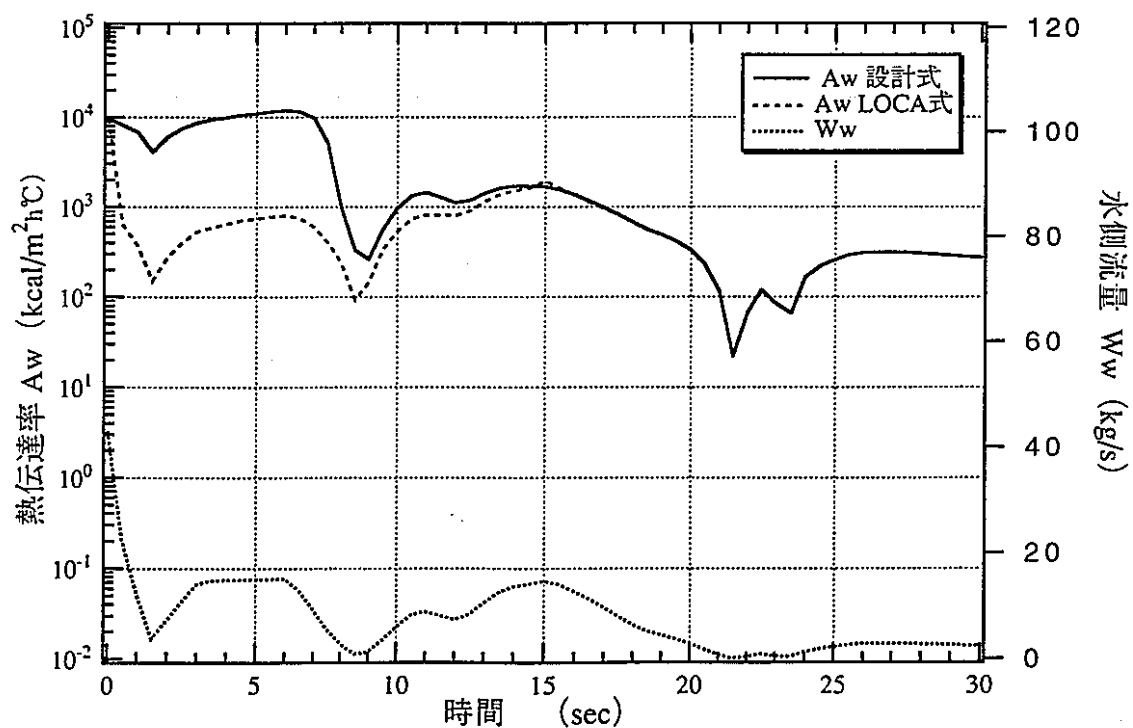


ケース6J (EV入口弁3B、EV出口弁 4B、40%出力) (メッシュ番号14)

図 - 水側熱伝達率と流量 (EVリンク8)



ケース6A (EV入口弁3B、EV出口弁 4B、40%出力)



ケース6J (EV入口弁3B、EV出口弁 4B、40%出力) (メッシュ番号14)

図 - 水側熱伝達率と流量 (EVリンク9)

表 10%定常出力運転時・加熱補正計算

| ケース | ケース名 | メッシュ<br>番号 | 計算条件サーベイパラメータ    |                                          |              |              |           |                |                 |                      | 計算結果          |                                         |                  |
|-----|------|------------|------------------|------------------------------------------|--------------|--------------|-----------|----------------|-----------------|----------------------|---------------|-----------------------------------------|------------------|
|     |      |            | Na側反応領域温度<br>(℃) | Na側反応域熱伝達率<br>(kcal/m <sup>2</sup> -h-℃) | 反応域長さ<br>(m) | 伝熱管肉厚<br>(m) | 出力<br>(%) | 給水流量<br>(kg/s) | 圧力<br>(kg/cm.a) | エンタルピ<br>(kcal/kg-h) | 水側温度TX<br>(℃) | 管内熱伝達率AWX<br>(kcal/m <sup>2</sup> -h-℃) | 伝熱管温度<br>STXX(℃) |
| A   | 10PA | 301        | 1200             | 6000                                     | 0.5          | 3.8          | 10        | 10.53          | 128             | 543.2                | 385.2         | 1154                                    | 1066             |
| E   | 10PE | 301        | 1200             | 4500                                     | 0.5          | 3.8          | 10        | 10.53          | 128             | 543.2                | 379.2         | 1178                                    | 1039             |
| I   | 10PI | 211        | 1000~1200        | 10000~4500                               | 0.5          | 3.8          | 10        | 10.53          | 128             | 543.2                | 351.4         | 1380                                    | 1014             |
|     |      | 241        |                  |                                          |              |              |           |                |                 |                      | 359.8         | 1305                                    | 1001             |
|     |      | 271        |                  |                                          |              |              |           |                |                 |                      | 368.3         | 1240                                    | 980.5            |
|     |      | 301        |                  |                                          |              |              |           |                |                 |                      | 376.2         | 1190                                    | 919.3            |
| J   | 10PJ | 211        | 1000~1200        | 8600~3500                                | 0.5          | 3.8          | 10        | 10.53          | 128             | 543.2                | 347.6         | 1437                                    | 978.4            |
|     |      | 241        |                  |                                          |              |              |           |                |                 |                      | 355.5         | 1341                                    | 967.1            |
|     |      | 271        |                  |                                          |              |              |           |                |                 |                      | 363.6         | 1276                                    | 955.8            |
|     |      | 301        |                  |                                          |              |              |           |                |                 |                      | 371.2         | 1220                                    | 910.8            |

添付資料C 水蒸気系各種弁仕様（実機熱過渡解析用データと最新データ）



表1523(1/2) 水素気系各道弁仕様 (更換初運転解除用データ)

EP-B0051 R9

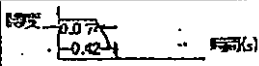
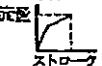
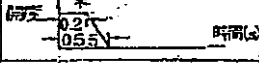
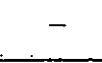
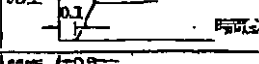
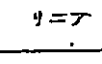
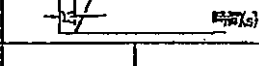
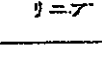
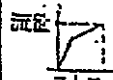
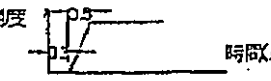
| 弁 名 称           | 個数 | 弁番号                                      | 用 途                            | 口 径                                                              | Cv 値   | 容量 t/hr(%)                   | 吹出圧<br>or 吹止圧<br>atg      | 全開-全閉<br>時 間<br>SEC                                                                   | ク時間<br>時定数<br>SEC                                                                     | 流量特性                                                              | 備 考                              |
|-----------------|----|------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------|------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 給 水 調 節 弁       | 1  | 320A-<br>CV002                           | 給 水 調 節                        | 10B                                                              | 250    | -                            | -                         | 15<br>(90%応答)                                                                         | 1/6                                                                                   | Equal %<br>リニア                                                    | Cv 値 vs 弁開度特性を<br>図 1523(1)に示す   |
| S H 入 口 放 出 弁   | 2  | 320A-<br>RV257 <sup>A</sup> <sub>B</sub> | Na-水反応時<br>放出用                 | 65mm<br>(のど部の径)<br>53                                            | 59.6/ヶ | 177/2ヶ<br>(46.7)             | -                         | 0.3                                                                                   | -                                                                                     | -                                                                 |                                  |
| E V 出 口 安 全 弁   | 2  | 320A-<br>RV251 <sup>A</sup> <sub>B</sub> | 圧 力 逃 し                        | 90mm<br>(のど部の径)<br>64                                            | 126/ヶ  | 217.0<br>210.6<br>(112.8/2ヶ) | 162/151<br>and<br>158/147 | 0.5                                                                                   | -                                                                                     | -                                                                 | 必要MIN379t/h/2ヶ                   |
| 気水分離器ドレン弁       | 1  | 320A-<br>CV115                           | 起動時の<br>EV 圧力制御                | 8 B                                                              | 133    | -                            | 152定値<br>(起動時127)         | 15<br>(90%応答)                                                                         | 1/6                                                                                   | Equal %                                                           | ・PI 制御<br>・水位制御については<br>#1527 参照 |
| S H バイパス弁       | 1  | 320A-<br>CV124                           | 主蒸気温度制御                        | 6 B                                                              | 320    | -                            | -                         | 15<br>(90%応答)                                                                         | 1/6                                                                                   | Equal %                                                           |                                  |
| E V 出 口 フ レ ン 弁 | 1  | 320A-<br>MV113                           | SG内部保水<br>ブロー用                 | Cv=223 の弁と開口面積1800mm <sup>2</sup> ±<br>20mm <sup>2</sup> のフローノズル |        |                              | /7atg                     | 36                                                                                    | -                                                                                     | -                                                                 |                                  |
| E V 入 口 放 出 弁   | 1  | 320A-<br>AV110                           | Na-水反応時<br>ブロー用                | 3 B                                                              | -      | 360<br>(95)                  | -                         | 1                                                                                     | -                                                                                     | -                                                                 |                                  |
| 給 水 止 め 弁       | 1  | 320A-<br>AV005                           | トリップ時等の<br>給水停止                | 10B                                                              | -      | -                            | -                         | 5 ± 1                                                                                 | -                                                                                     | -                                                                 |                                  |
| 蒸 気 加 減 弁       | 4  | 330-<br>HV102 <sup>A</sup> <sub>B</sub>  | 主蒸気圧力制御                        | 8 B                                                              | -      | 1ヶ ~ 3ヶ<br>3573/ヶ<br>4ヶ 2030 | 127定値                     |    |    | 開弁順序<br>1 ~ 3 弁は同時<br>全開で 4 弁開                                    |                                  |
| 主 蒸 気 止 め 弁     | 2  | 330-<br>HV101 <sup>A</sup> <sub>B</sub>  | タービン停止                         | 12B                                                              | -      | -                            | -                         |    |    | ※0.2s には EHC を作動させる<br>信号遅れを含みます。<br>原子炉トリップ後、断層開か<br>らは0.3s となる。 |                                  |
| タービンバイパス弁       | 2  | 330-<br>HV103 <sup>A</sup> <sub>B</sub>  | 主蒸気圧力制御                        | -                                                                | -      | 568.5/2ヶ<br>(50)             | 127定値                     |  |  | タービントリップ時の断層シ<br>グナスについては図 1523(2)<br>を参照                         |                                  |
| 主 蒸 気 逃 し 弁     | 3  | 320-<br>RV259 <sup>A</sup> <sub>B</sub>  | 主蒸気逃し<br>(タービンバイパス<br>のバックアップ) | 65<br>(のど部の径)<br>54                                              | 63/ヶ   | 235.2/3ヶ<br>(20.7)           | 138/134.6                 |  |  | リニア                                                               |                                  |
| S H 出 口 安 全 弁   | 2  | 320A-<br>RV252 <sup>A</sup> <sub>B</sub> | 圧 力 逃 し                        | 40<br>(のど部の径)<br>30                                              | 26/ヶ   | 359<br>348<br>(18.6/2ヶ)      | 144/134<br>and<br>148/138 | 0.5                                                                                   | -                                                                                     | -                                                                 | 必要MIN57t/h/2ヶ                    |
| S H 出 口 ド レ ン 弁 | 1  | 320A-<br>MV132                           | SG 内部<br>保水ブロー用                | Cv=223 の弁と開口面積1800mm <sup>2</sup> ±<br>20mm <sup>2</sup> のフローノズル |        |                              | /7atg                     | 36                                                                                    | -                                                                                     | -                                                                 |                                  |
| S H 出 口 逆 止 弁   | 1  | 320A-<br>V009                            | 逆 流 防 止                        | 14B                                                              | -      | -                            | -                         | 3                                                                                     | -                                                                                     | -                                                                 |                                  |
| S H 入 口 止 め 弁   | 1  | 320A-<br>AV006                           | S H 隔離<br>(Na-水反応時<br>及び過分流入時) | 12B                                                              | -      | -                            | -                         | 5                                                                                     | -                                                                                     | -                                                                 |                                  |
| E V 出 口 放 出 弁   | 2  | 320A-<br>RV256 <sup>A</sup> <sub>B</sub> | Na-水反応時<br>放出用                 | 65<br>(のど部の径)<br>53                                              | -      | 198/2ヶ<br>(52)               | -                         | 0.3                                                                                   | -                                                                                     | -                                                                 |                                  |
| S H 出 口 放 出 弁   | 2  | 320A-<br>RV253 <sup>A</sup> <sub>B</sub> | Na-水反応時<br>放出用                 | 65<br>(のど部の径)<br>53                                              | -      | 147.5/2ヶ<br>(33.9)           | -                         | 0.3                                                                                   | -                                                                                     | -                                                                 |                                  |

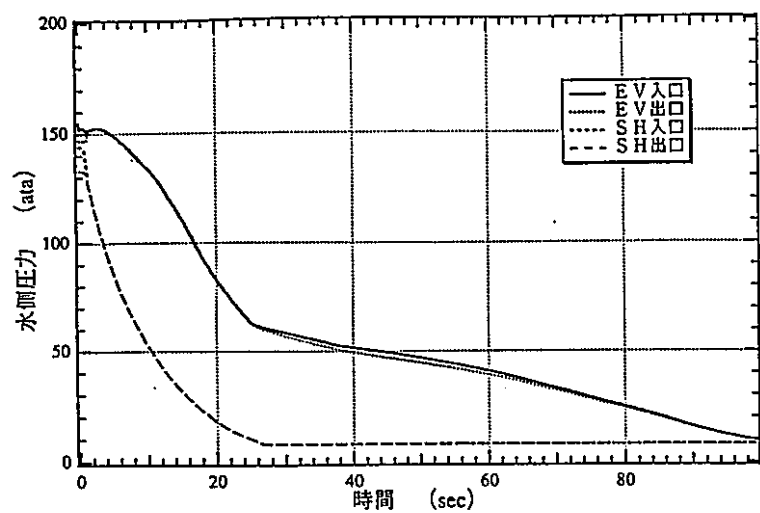
表15.23-2\* 水蒸気系各種弁仕様 (最新データ)

\* 本表は、加圧水冷却炉(200MW)の設計仕様書、  
JNC ZJ2449 90-001

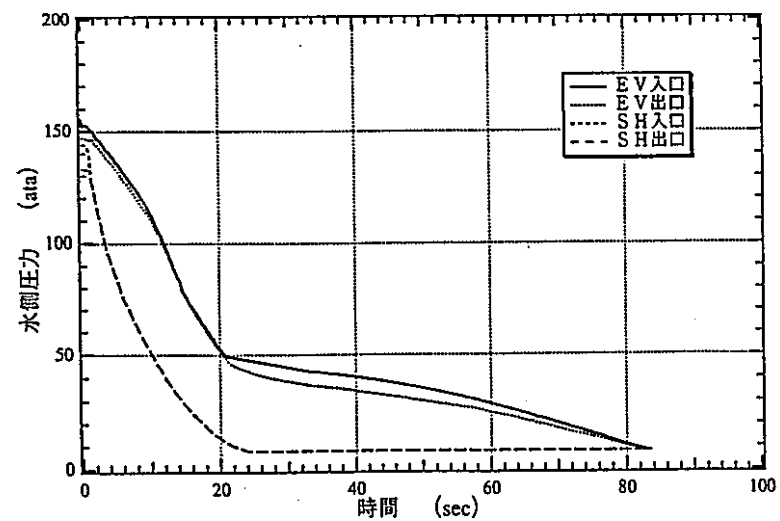
| 弁 名 称     | 個数 | 弁 番 号                         | 用 途                           | 口 径                          | Cv 値    | 容量t/hr (%)                      | 吹出圧/吹止圧<br>or制御圧atg       | 全開→全閉<br>時 間<br>S E C                                                                      | ムダ時間/時定数<br>S E C | 流量特性                                                                                | 備 考                                                               |
|-----------|----|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|---------|---------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 給水調節弁     | 1  | 320A-CV002                    | 給水調整                          | 8B                           | 275(定格) | —                               | —                         | 15<br>(90%応答)                                                                              | 1/6               | モデファイド<br>バラボリック                                                                    | Cv値vs弁開度特性を<br>図15.23(4)に示す                                       |
| SH入口放出弁   | 2  | 320A-<br>RV257A<br>B          | Na-水反応時<br>放 出 用              | 65mm<br>(のど部の径)<br>51        | —       | 237.2/2ヶ<br>(62.6)              | —                         | 0.3                                                                                        | —                 | —                                                                                   |                                                                   |
| EV出口安全弁   | 2  | 320A-<br>RV251A<br>B          | 圧力逃し                          | 80mm<br>(のど部の径)<br>56.5/57.3 | —       | 189.5<br>190.4<br>(100.2/2ヶ)    | 162/151<br>and<br>158/147 | 0.5                                                                                        | —                 | —                                                                                   | 必要MIN379t/h/2ヶ                                                    |
| 気水分離器ドレン弁 | 1  | 320A-<br>CV115                | 起動時のEV<br>圧力制御                | 8B                           | 125(定格) | —                               | 148定値<br>(起動時127)         | 15<br>(90%応答)                                                                              | 1/6               | (注1)<br>モデファイド<br>バラボリック                                                            | 全閉シートリークは<br>$\frac{1}{1000} \times Cv$ 、<br>Cvは定格Cv値。(注2)        |
| SHバイパス弁   | 1  | 320A-<br>CV124                | 主蒸気温度制御                       | 6B                           | 230(定格) | —                               | —                         | 15<br>(90%応答)                                                                              | 1/6               | 同 上                                                                                 | 全閉シートリークは<br>$\frac{5}{1000} \times Cv$ 、<br>Cvは定格Cv値。(注2)        |
| 蒸気加減弁     | 4  | 330-<br>HV102A<br>B<br>C<br>D | 主蒸気圧力制御                       | 8B                           | —       | #1弁～#3弁<br>357.3/ヶ<br>#4弁 203.0 | 127定値                     | 15-18<br>(一定速度)<br>急 閉 時<br>0.12                                                           | 急 閉 時 間<br>0.05   |  | 開弁順序<br>#1～#4弁までシークバルブ                                            |
| タービンバイパス弁 | 2  | 330-<br>HV103A<br>B           | 主蒸気圧力制御                       | —                            | —       | 568.5/2弁<br>(50)                | 127定値                     | 1弁: 1～3<br>2弁: 2～6<br>(一定速度)<br>急 閉 時<br>0.3                                               | 急 閉 時 間<br>0.3    | リ ニ ア                                                                               | 開弁順序<br>#1～#4弁までシークバルブ<br>シットロック動作開始は、タービン<br>弁弁弁#1の開度10%で<br>ある。 |
| 主蒸気逃し弁    | 3  | 320-<br>RV259A<br>B<br>C      | 主蒸気逃し弁<br>(タービン出口弁)<br>(のど部径) | 85mm<br>(のど部の径)<br>51        | —       | 293.1/3ヶ<br>(25.8)              | 138/134.6                 | 開度<br> | —                 | リ ニ ア                                                                               |                                                                   |
| SH出口安全弁   | 2  | 320A-<br>RV252A<br>B          | 圧力逃し                          | 40mm<br>(のど部の径)<br>26.6      | —       | 31.8<br>30.9<br>(16.5/2ヶ)       | 148/138<br>and<br>144/134 | 0.5                                                                                        | —                 | —                                                                                   | 必要MIN57t/h/2ヶ                                                     |
| EV出口放出弁   | 2  | 320A-<br>RV256A<br>B          | Na-水反応時<br>放 出 用              | 65mm<br>(のど部の径)<br>51        | —       | 244/2ヶ<br>(64.4)                | —                         | 0.3                                                                                        | —                 | —                                                                                   |                                                                   |
| SH出口放出弁   | 2  | 320A-<br>RV258A<br>B          | Na-水反応時<br>放 出 用              | 65mm<br>(のど部の径)<br>51        | —       | 185.2/2ヶ<br>(48.9)              | —                         | 0.3                                                                                        | —                 | —                                                                                   |                                                                   |

(注1) 気水分離器ドレン弁及びSHバイパス弁の流量特性曲線は、給水調節弁と同じ  
関数形であり、図15.23(4)の定格Cv値を各弁の値としたものである。(注2) 気水分離器ドレン弁及びSHバイパス弁の全閉時シートリーク値は、弁特性  
(Equal%→モデファイドバラボリック)が変わっても従来値と変わらない。

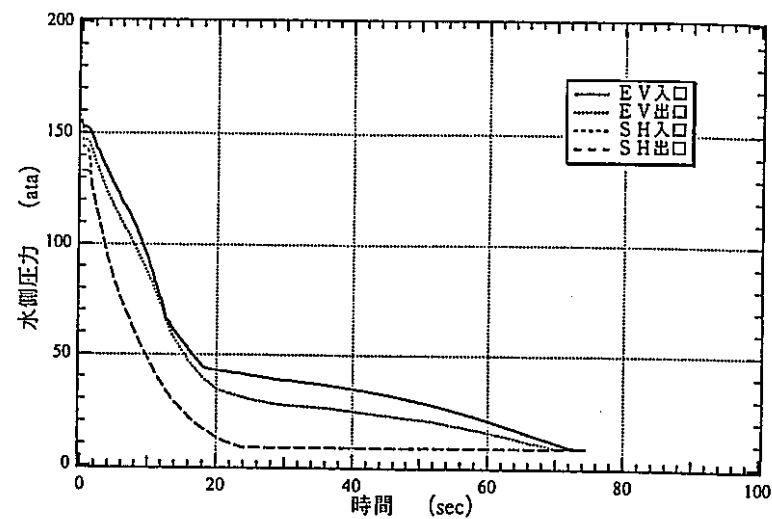
添付資料D ケースⅠからⅣの水ブロー解析結果



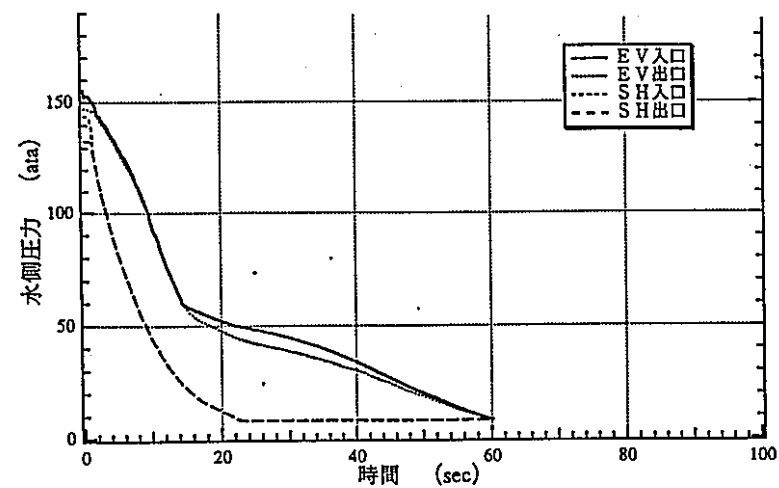
ケース1' (EV出口弁 4B)



ケース2' (EV出口弁 6B)

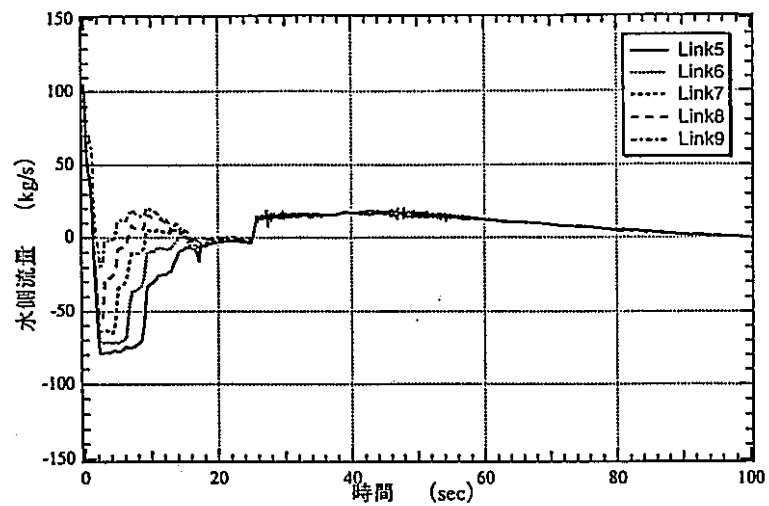


ケース3' (EV出口弁 8B)

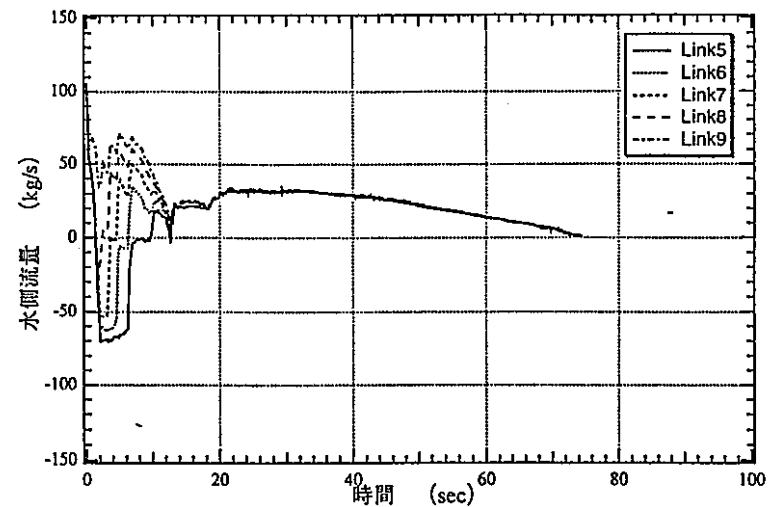


ケース4' (EV入口弁 4B、EV出口弁 6B)

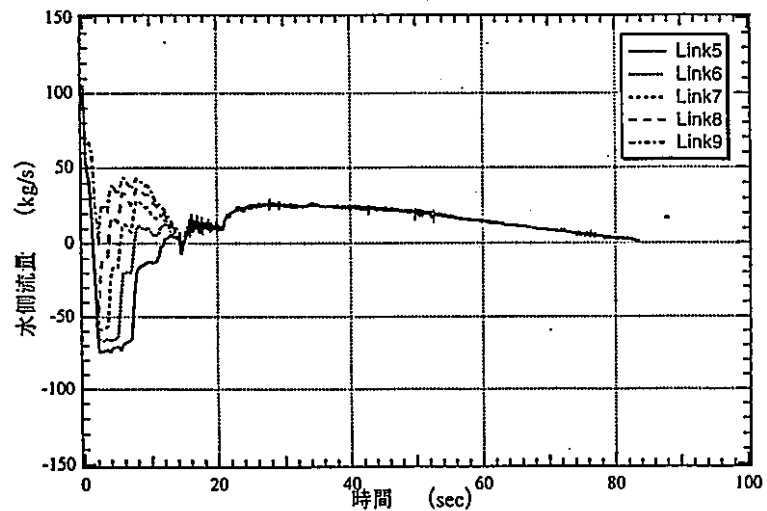
図 D-1 SG 出入口圧力変化 (定格運転状態からのブロー)



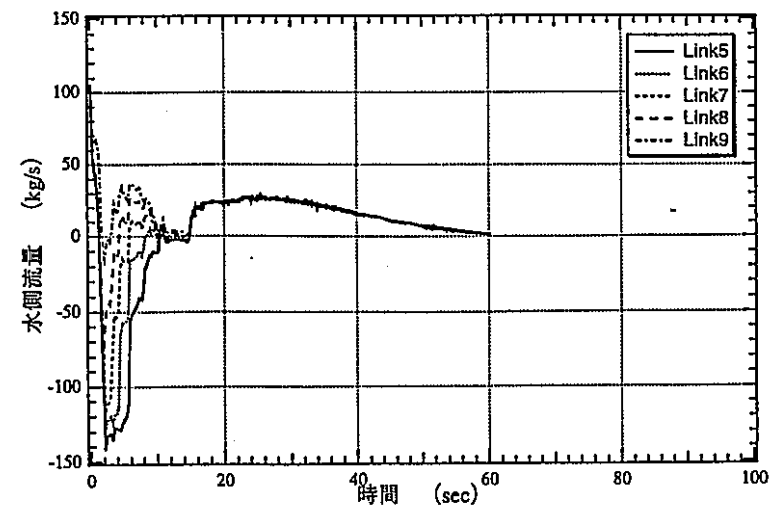
ケース1 (EV出口弁 4B)



ケース3 (EV出口弁 8B)

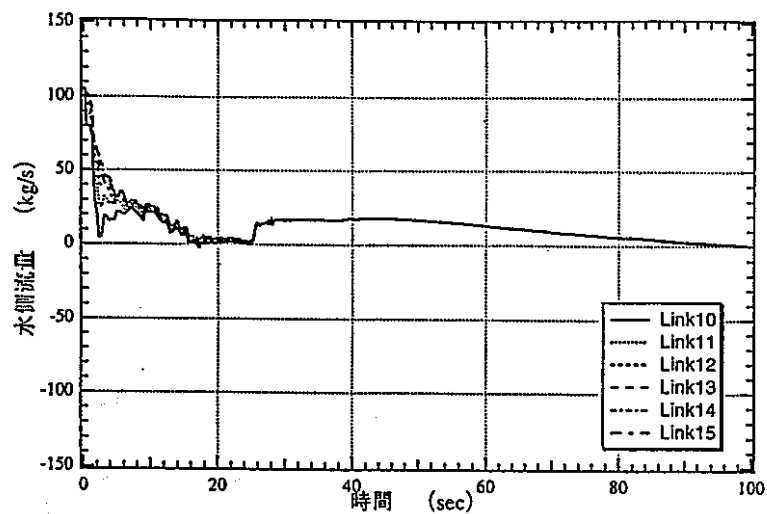


ケース2' (EV出口弁 6B)

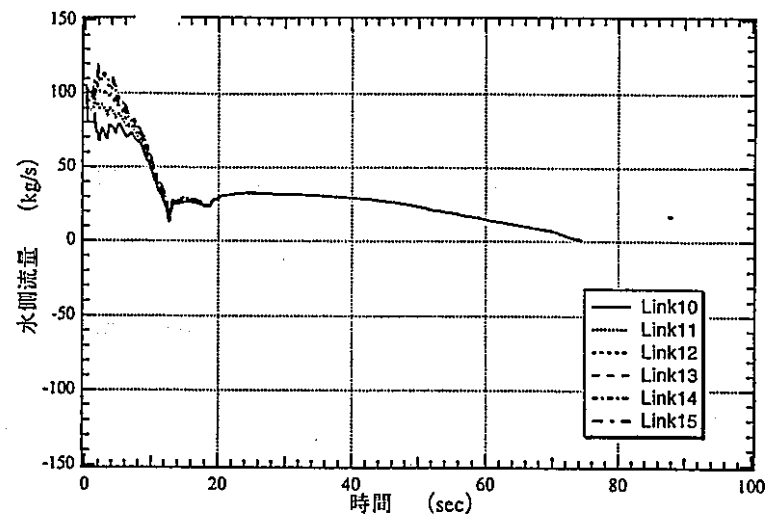


ケース4' (EV入口弁4B、EV出口弁6B)

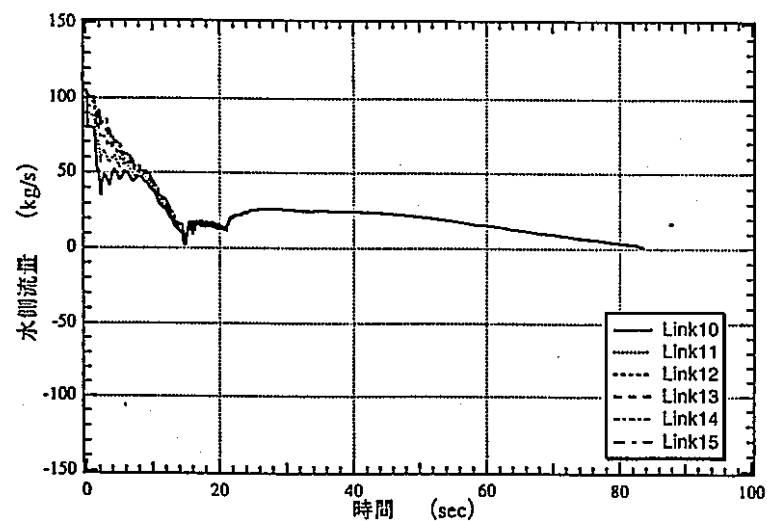
図D-2 EVコイル下部流量変化 (定格運転状態からのブロー)



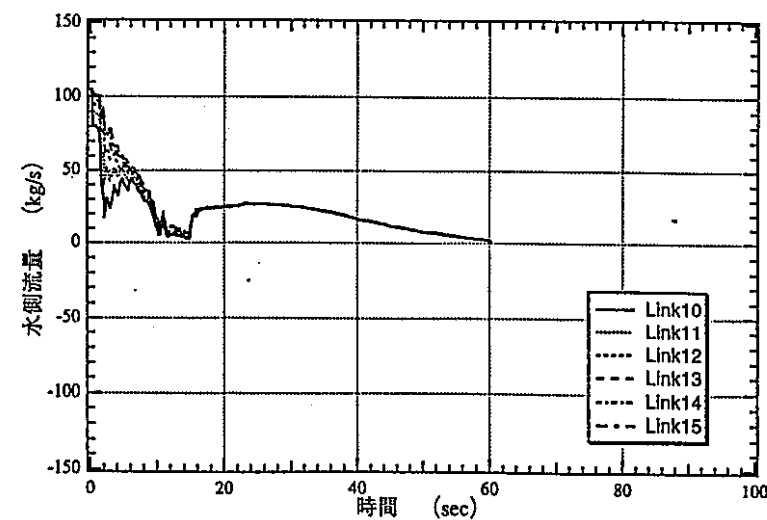
ケース1 (EV出口弁 4B)



ケース3 (EV出口弁 8B)

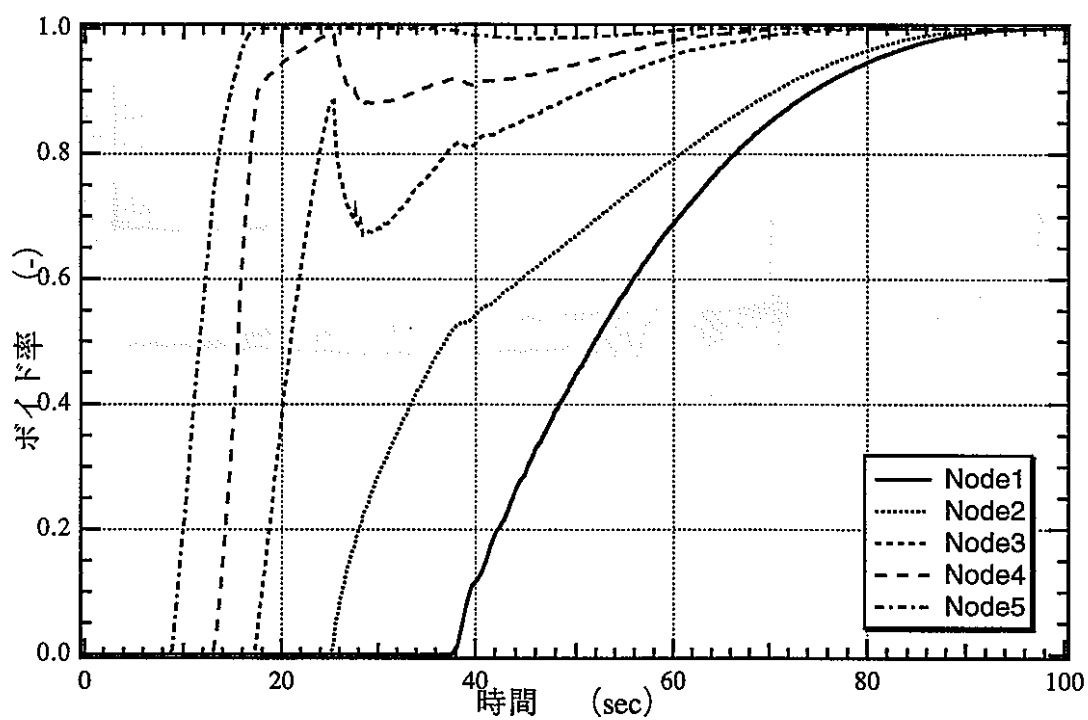


ケース2 (EV出口弁 6B)

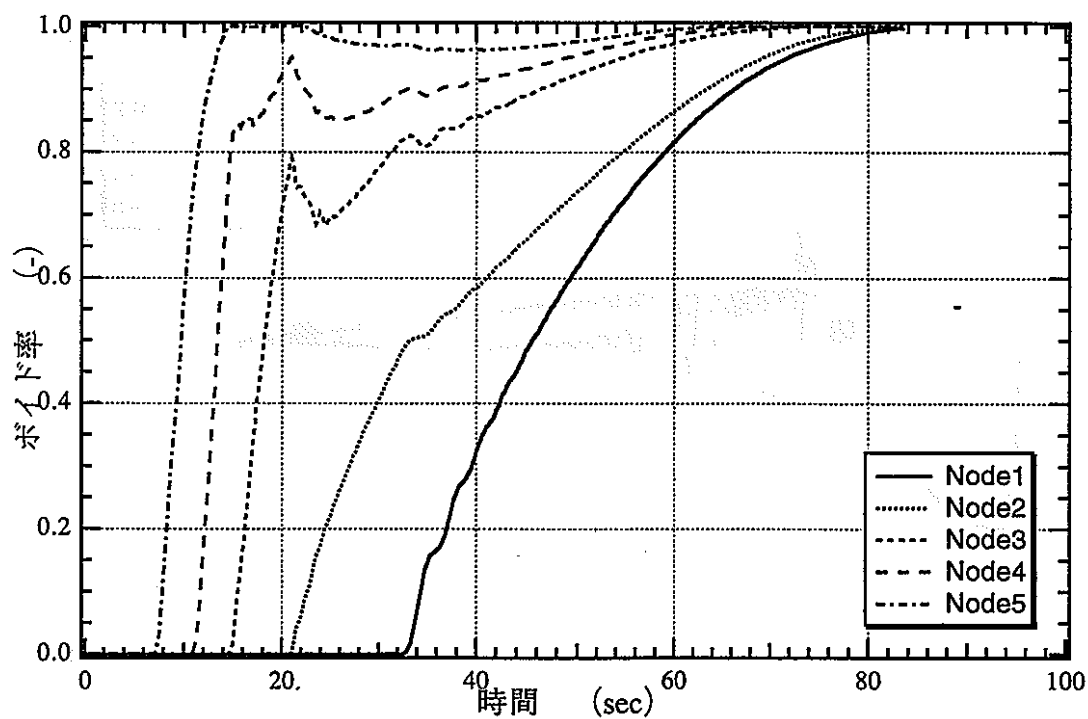


ケース4 (EV入口弁4B、EV出口弁6B)

図D-3 EVコイル上部流量変化 (定格運転状態からのブロー)

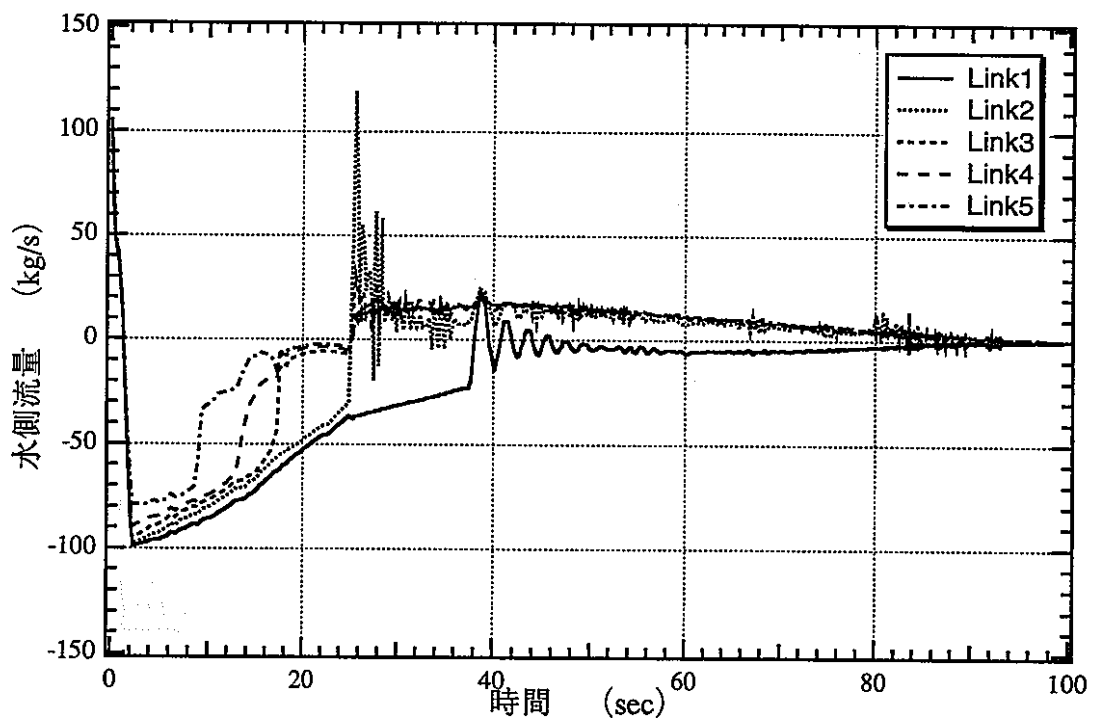


ケース1' (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

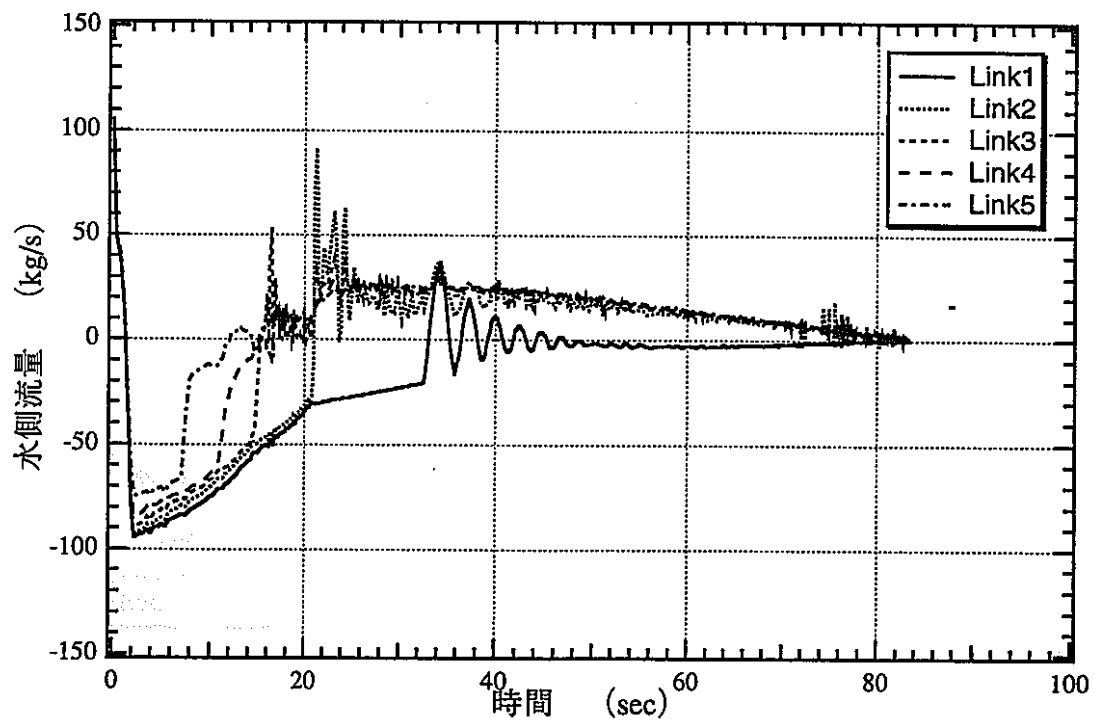


ケース2' (EV入口弁3B、EV出口弁 6B)

図 D-4 ボイド率変化 (定格運転状態からのブロー)



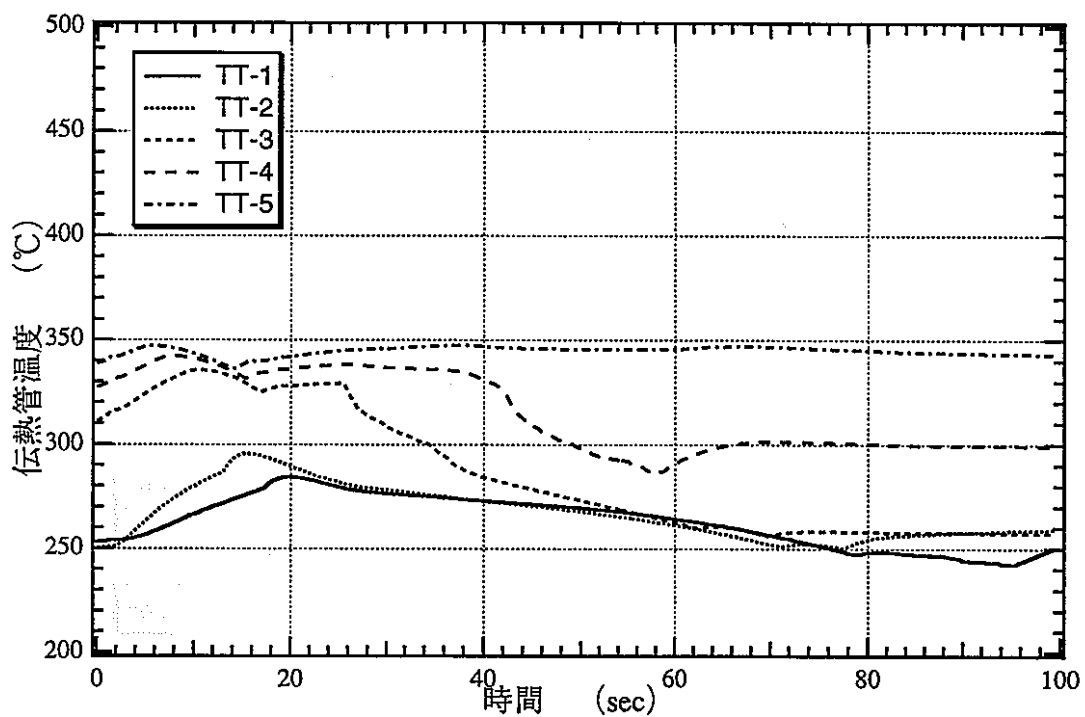
ケース1' (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)



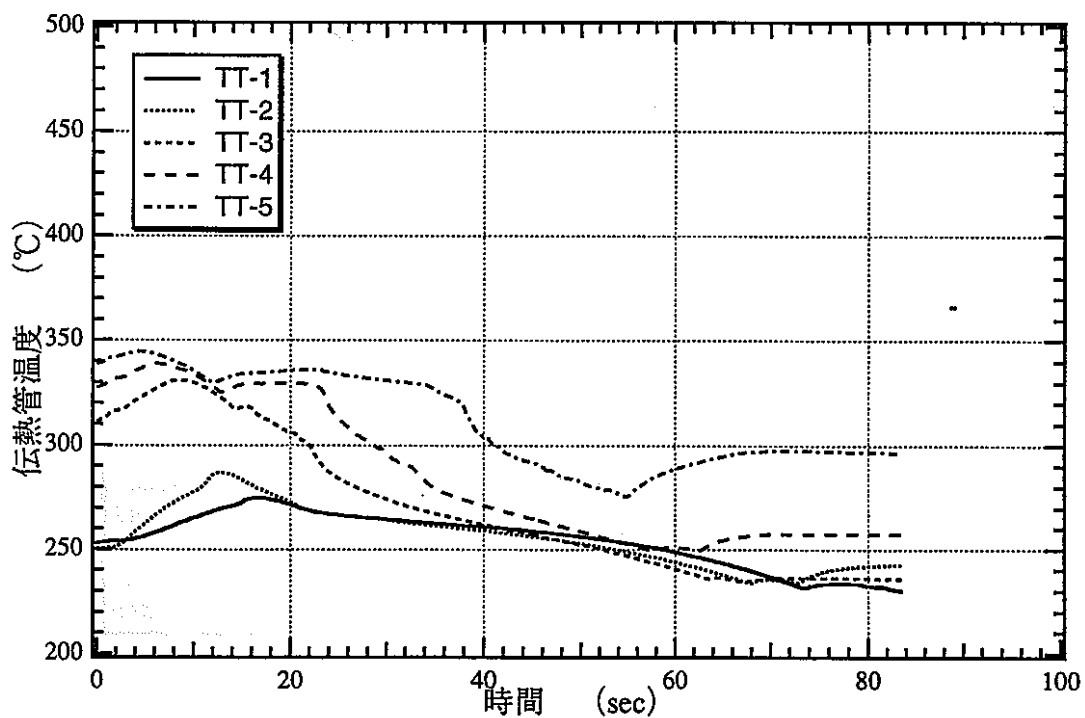
ケース2' (EV入口弁3B、EV出口弁 6B)

図 D-5 EVコイル下部流量変化 (定格運転状態からのブロー)



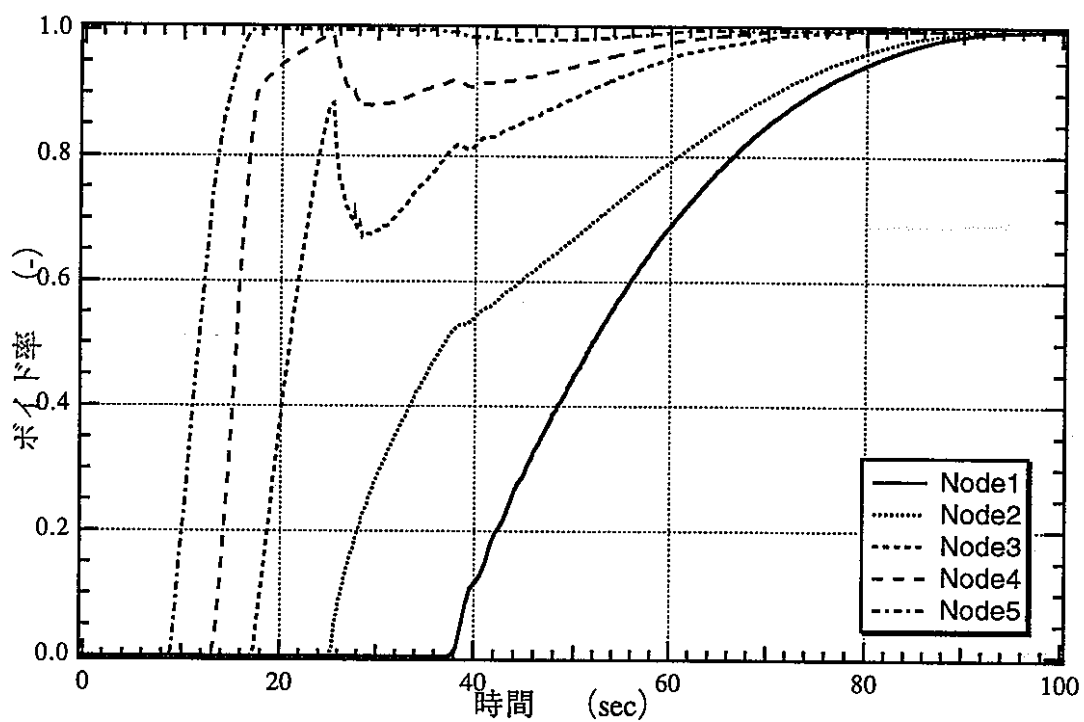


ケース1' (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

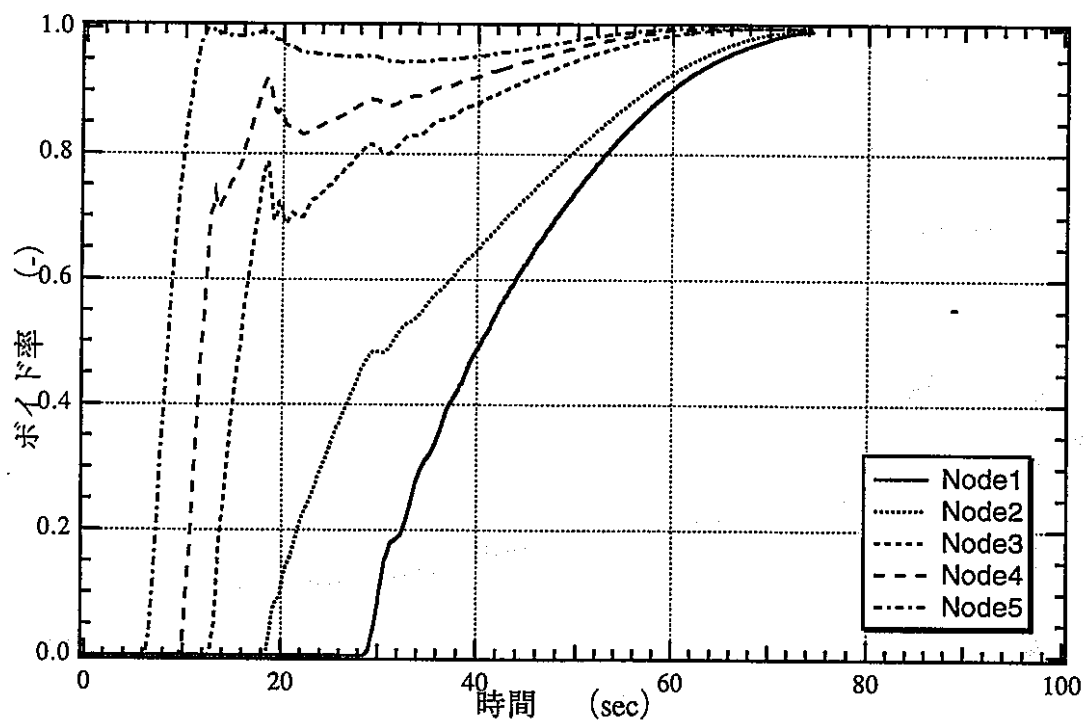


ケース2' (EV入口弁3B、EV出口弁 6B)

図 D-6 伝熱管温度変化 (定格運転状態からのブロー)

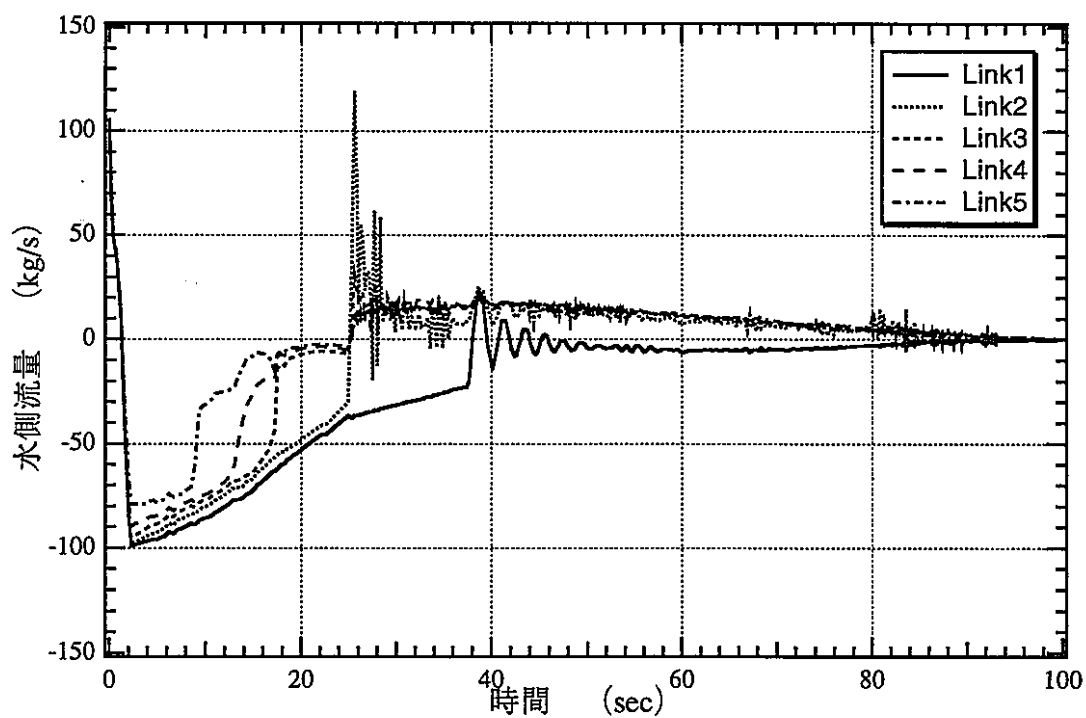


ケース1' (EV入口弁3B、EV出口弁4B)

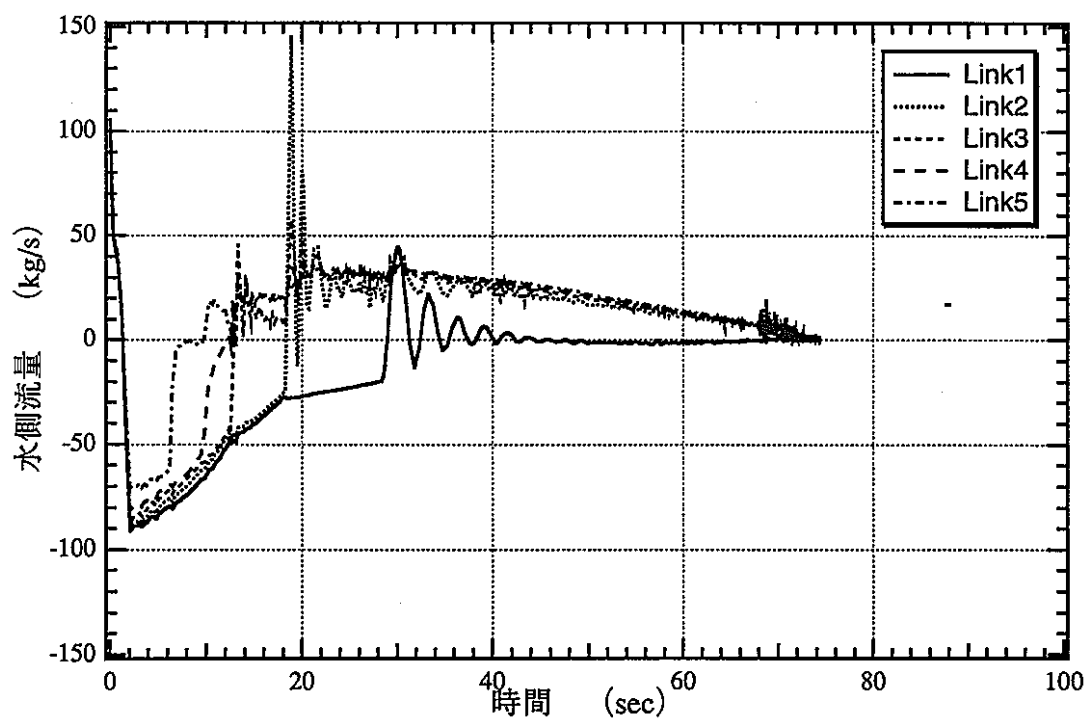


ケース3' (EV入口弁3B、EV出口弁8B)

図 D-7 ボイド率変化 (定格運転状態からのブロー)

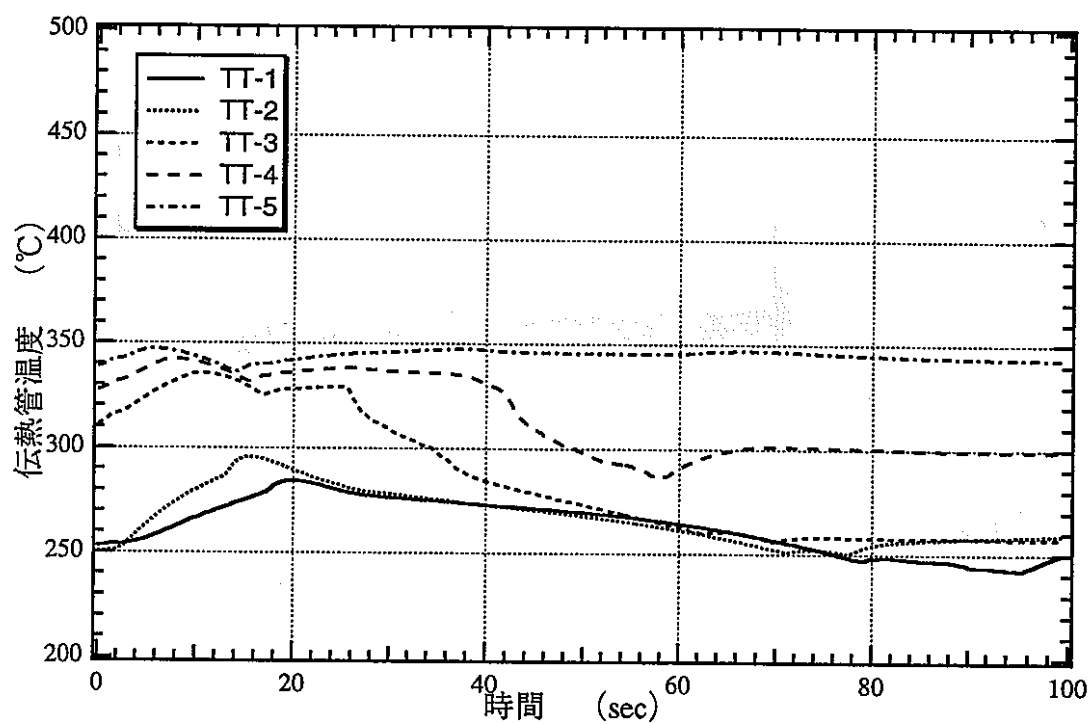


ケース1' (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)

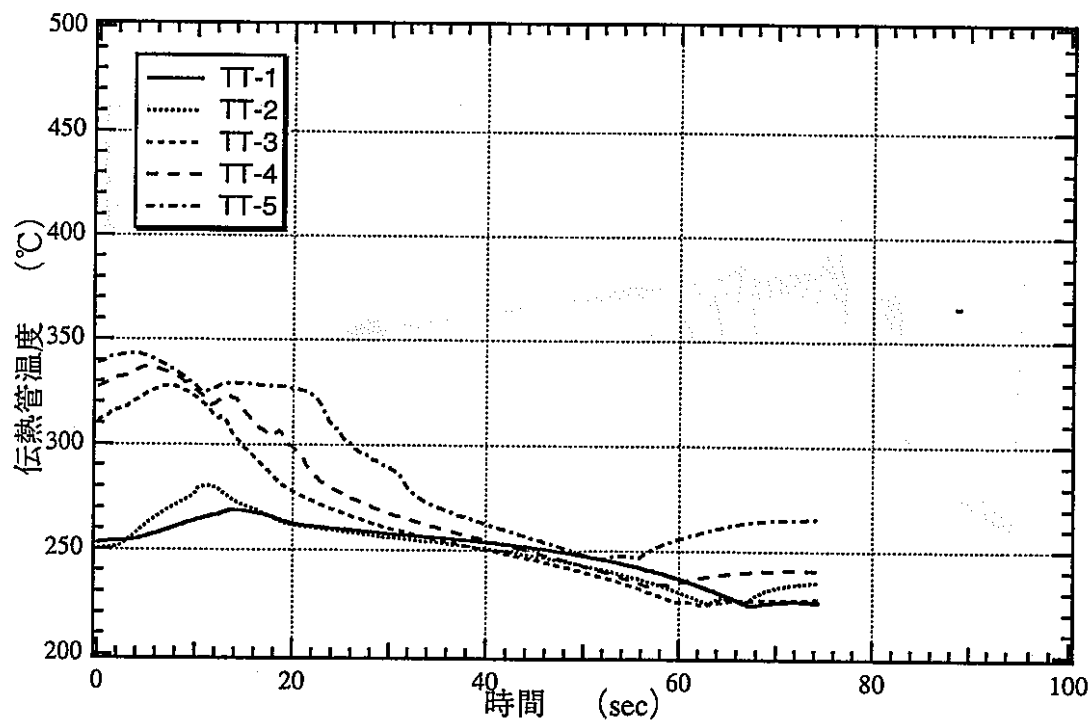


ケース3' (EV入口弁3B、EV出口弁 8B)

図 D-8 EVコイル下部流量変化 (定格運転状態からのブロー)



ケース1' (EV入口弁3B、EV出口弁 4B)



ケース3' (EV入口弁3B、EV出口弁 8B)

図 D-9 伝熱管温度変化 (定格運転状態からのブロー)

添付資料E 適用した水/蒸気二相流熱伝達率相関式

SG伝熱管内熱伝達率評価用相関図を図E-1 に示す。2 相域の使用伝熱式は以下の通りである。

i. 核沸騰熱伝達

以下のJens-Lottes の相関式により計算する。

$$\Delta T_{sat} = \frac{50.98(\dot{Q}/A)^{1/4}}{\exp(P/900)} \dots\dots\dots (1)$$

|                       |                                       |                                |
|-----------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| ここで、 $\Delta T_{sat}$ | : 壁面の過熱度                              | ( $T_w - T_{sat}$ ) (°F)       |
| $T_w$                 | : 壁面の温度                               | (°F)                           |
| $T_{sat}$             | : 冷却材飽和温度                             | (°F)                           |
| $\dot{Q}/A$           | : 表面熱流束                               | (Btu/sec-in <sup>2</sup> )     |
| $P$                   | : 冷却材圧力                               | (psia)                         |
| $H$                   | : 熱伝達率 = $(\dot{Q}/A)/\Delta T_{sat}$ | (Btu/sec-in <sup>2</sup> · °F) |

・バーンアウト熱流束（ドライアウト判定）

(i) 飽和水の場合

以下のKutateladze によるプール沸騰のバーンアウト熱流束の相関式を用いる。

$$q_{bo} = K \cdot L / v_v \cdot [\sigma \cdot v_v \cdot g^2 \cdot (v_v - v_l) / v_l]^{1/4} 3600 \dots\dots\dots (2)$$

|               |                  |                           |
|---------------|------------------|---------------------------|
| ここで、 $q_{bo}$ | : 熱流束            | (kcal/m <sup>2</sup> · h) |
| $K$           | : 定数 0.13 ～ 0.19 | (0.13 を適用)                |
| $L$           | : 蒸発潜熱           | (kcal/kg)                 |
| $\sigma$      | : 表面張力           | (kg/m)                    |
| $g$           | : 重力加速度          | (m/s <sup>2</sup> )       |
| $v$           | : 比容積            | (m <sup>3</sup> /kg)      |
| 添字            |                  |                           |
| $\ell$        | : 液体             |                           |
| $v$           | : 蒸気             |                           |

(ii) サブクール水の場合

以下のKutateladze による相関式を用いる。

$$q_{bo}^{sub} = q_{bo} \{1 + 0.065(v_v/v_l)^{0.8} (C_{pf} \Delta T_{sub})/L\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $q_{bo}$  は (2) 式による。

ii. 膜沸騰熱伝達 (バーンアウト後の熱伝達)

(i) 低流量、( $Re \leq 10^4$ ) 低ボイド率領域 (ボイド率  $< 0.65$ )

以下のBromley の相関式により計算する。

$$H = 0.62 \left\{ \frac{kg^3 \cdot g \cdot \rho_g (\rho_f - \rho_g) (h_g - h_f)}{L_H \cdot \mu_g (T_w - T_{sat})} \right\}^{1/4} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $H$  : 熱伝達率 (Btu/hr · ft<sup>2</sup> · F)

$T_w - T_{sat}$  : 壁温と冷却材飽和温度の差 (F)

$g$  : 重力加速度 (ft/hr<sup>2</sup>)

$\rho_g \cdot \rho_f$  : 蒸気及び水の密度 ( $\ell_b/\text{ft}^3$ )

$kg$  : 蒸気の熱伝導率 (Btu/hr · ft · F)

$h_{fg}$  : 水の蒸発潜熱 (Btu/ $\ell_b$ ) (=  $h_g - h_f$ )

$\mu_g$  : 蒸気の粘性係数 ( $\ell_b^*/\text{ft} \cdot \text{hr}$ )

$L_H$  : 沸騰代表長さ (Helmholz の不安定波長)

$$L_H = 16.24 \left\{ \frac{g_c^4 \cdot \sigma_f^4 \cdot h_{fg}^3 \cdot \mu_g^5}{\rho_g (\rho_f - \rho_g)^5 \cdot g^5 \cdot kg^3 \cdot (T_w - T_{sat})^3} \right\}^{1/11}$$

$\sigma_f$  : 表面張力 ( $\ell_b/\text{ft}$ )

(ii)  $Re > 10^4$  (但し、逆流の場合  $Re > 10^6$ )

以下のDougall-Rohsenow の相関式により計算する。

$$H = 0.023 \left( \frac{kg}{D_E} \right) \left[ \frac{\rho_g \cdot D_E}{\mu_g} \left( \frac{G(1-X)}{\rho_l} + \frac{G(X)}{\rho_g} \right) \right]^{0.8} \times (P_{rs})^{0.4} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $H$  : 熱伝達係数 (Btu/hr · ft<sup>2</sup> · F)

$kg$  : 蒸気の熱伝導率 (Btu/hr · ft · F)

$D_E$  : 水力学的直径 (ft)

$\rho_g \cdot \rho_f$  : 蒸気及び水の密度 ( $\ell_b/\text{ft}^3$ )

$\mu_g$  : 蒸気の粘性係数 ( $\ell_b/\text{ft} \cdot \text{hr}$ )

$G$  : 質量速度 ( $\ell_b/\text{ft}^2 \cdot \text{hr}$ )

$X$  : 蒸気重量率

$P_{rs}$  : プラントル数 (蒸気)

(iii) 低流量、高ボイド率領域  $Re \leq 10^4$ 、( $\alpha > 0.65$ )

以下のGroeneveldの相関式により計算する。

$$H = \frac{kg}{D_E} \cdot 0.052 \left[ Re_g \left( x + \frac{\rho_g}{\rho_l} (1-x) \right) \right]^{0.688} P_{rs}^{1.26} Y^{-1.06} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$Y = 1 - 0.1 \left( \frac{\rho_l}{\rho_g} - 1 \right)^{0.4} \cdot (1-x)^{0.4}$$

ここで、 $H$  : 熱伝達係数 (Btu/hr · ft<sup>2</sup> · F)

$kg$  : 蒸気の熱伝導率 (Btu/hr · ft · F)

$D_E$  : 水力学的直径 (ft)

$\rho_g, \rho_l$  : 蒸気及び水の密度 ( $\text{lb/ft}^3$ )

$X$  : 蒸気重量率

$P_{rs}$  : プラントル数 (蒸気)

$Re_g$  : 蒸気のレイノルズ数

(iv) 低流量、遷移域 ( $Re \leq 10^4$ 、( $0.65 < \alpha < 0.75$ ))

$$H = \{1 - 10(\alpha - \alpha_T)\} H_{Bromley} + 10(\alpha - \alpha_T) H_{MIST} \quad \dots\dots\dots (7)$$

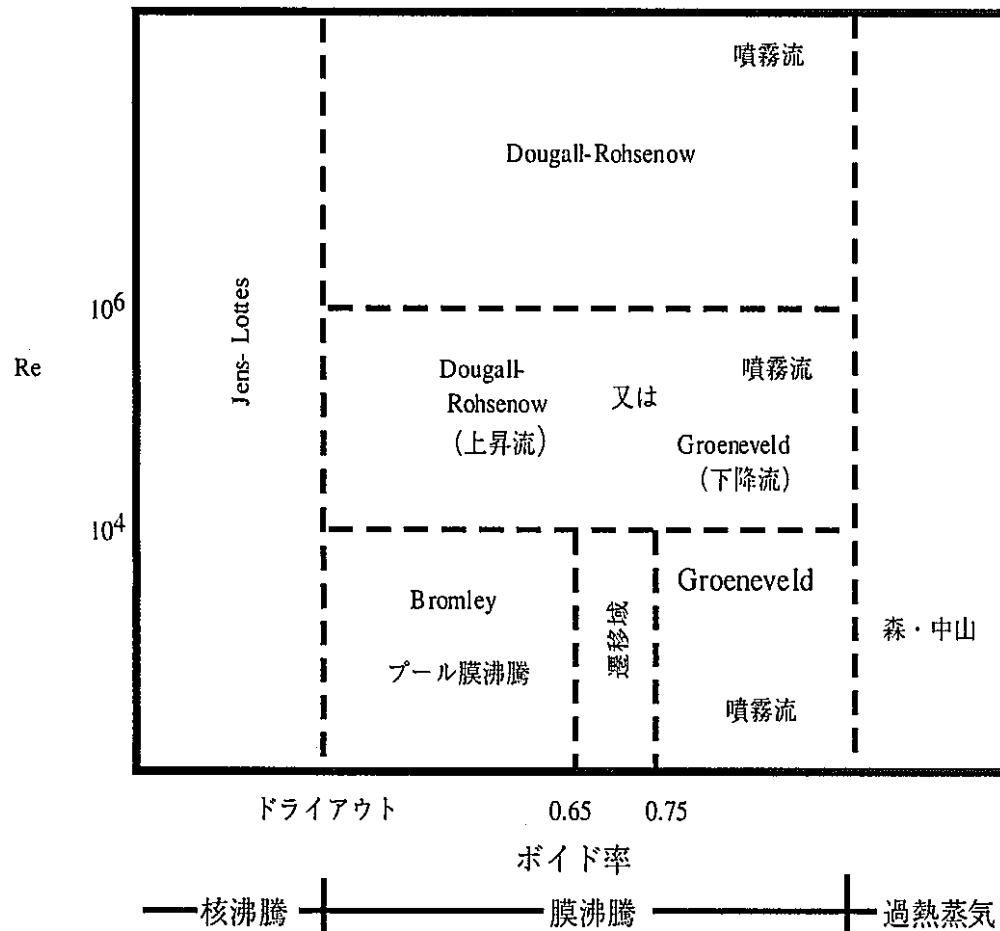
ここで、 $\alpha_T$  : 遷移ボイド率 (0.65)

$\alpha$  : ボイド率

$H_{Bromley}$  : Bromley による熱伝達率 (kcal/m<sup>2</sup>h°C)

$H_{MIST}$  : Groeneveld による噴霧流熱伝達率 (kcal/m<sup>2</sup>h°C)





図E-1 SG伝熱管内熱伝達率評価用相関図

核沸騰：伝熱面の過熱度 $\Delta T_{sat}$ に依存

プール沸騰、強制対流沸騰、サブクール沸騰の何れでもあまり違いはない。

伝熱面の水平、垂直、傾斜等の影響小。

膜沸騰：過熱面と液体との間の安定した蒸気膜を介しての熱伝達。

強制対流条件でも、熱流束が著しく大きい場合にはプール膜沸騰と同様の状態となる。

[逆環状流] 伝熱面を蒸気膜が覆って、中心は気泡を含む液体。低クオリティ領域で出現。

(プール膜沸騰と似た状態)

[噴霧流] 蒸気の中を液体が液滴として流れる形態。

高クオリティ領域で出現。蒸気流による強制対流熱伝達が主体。

[遷移域] 逆環状流と噴霧流が混在した状態。

BWRと同様プール膜沸騰と噴霧流熱の熱伝達からボイド率により内挿。

蒸気・水単相熱伝達：森中山の式

・原研の低流量熱伝達実験 ( $0.3-1 \times 1.0 \text{E}6 \text{kg/m}^2\text{h}$  :

約10-40kg/s相当) ではDougall-Rohsenow は過大評価

Groeneveldの式が比較的合うとの結果

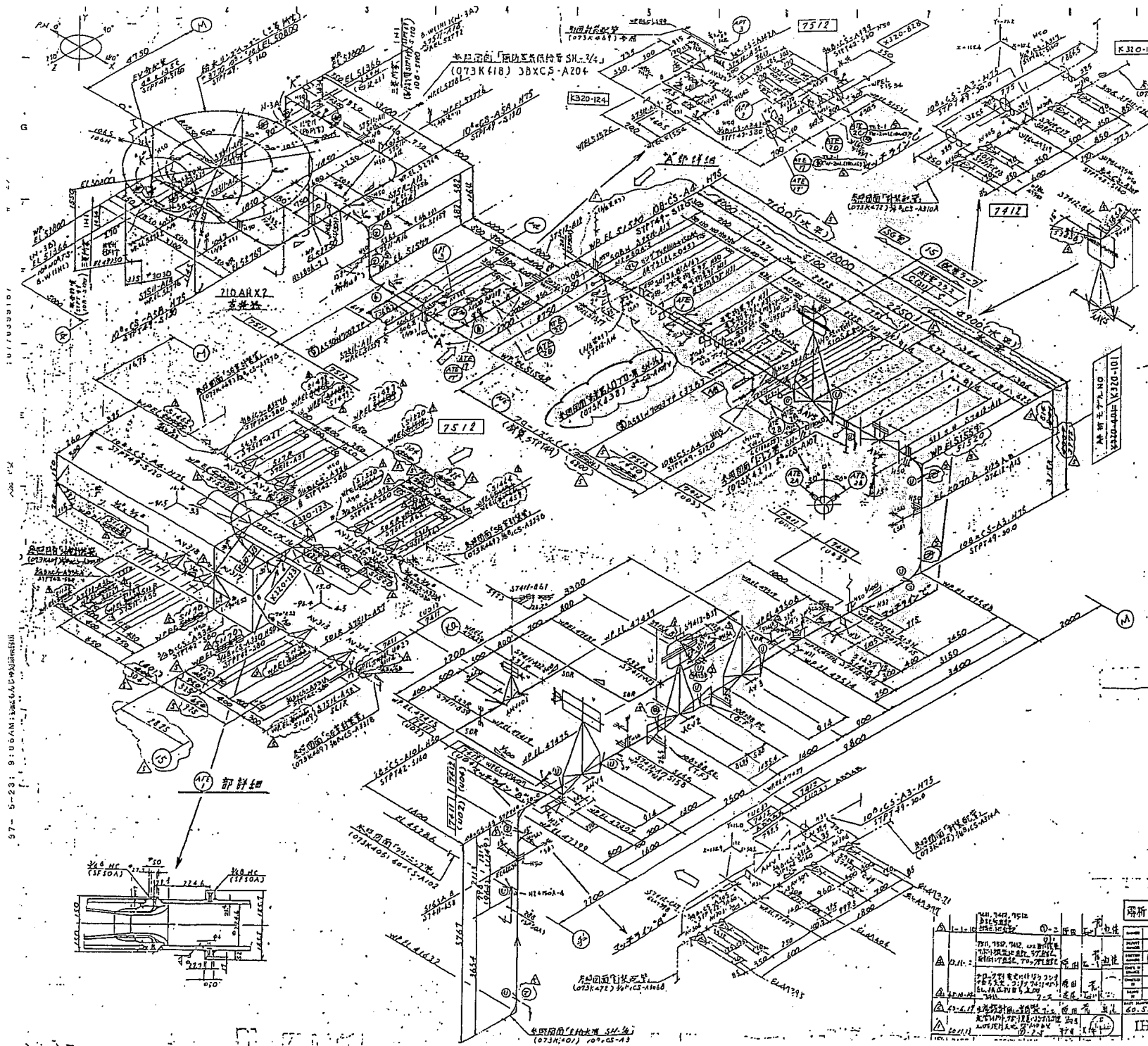
・ATRの試験結果

上昇流： $Re \geq 1\text{E}4$ はDougall-Rohsenowに合う

下降流：高流量  $Re \geq 1\text{E}6$  : Dougall-Rohsenowに合う

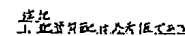
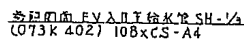
低流量  $Re < 1\text{E}6$  : Dougall-Rohsenowより小

添付資料F EV入口放出ラインのアイソメ図



備考  
 1. 1号機は、新設計の標準図を用い、2号機は、旧設計の標準図を用いた。  
 2. 両機とも、同じ設計の標準図を用いた。(同一設計図)

| 関連図書 |             |                    |
|------|-------------|--------------------|
| NO.  | 図書番号        | 図書名称               |
|      | 073K203-204 | 総合配置図、56巻上巻        |
| 1    | 073K401-717 | 、配管シツウ             |
|      | 073K401-718 | 、配管シツウ             |
|      | 073K401-719 | 、配管シツウ             |
| 2    | 076K011     | 配管系統図、水素発生 (PA・ED) |
|      | 071K402     | 、配管シツウ、(PD)        |
| 3    | 071K011     | 、配管シツウ             |
| 4    | 071K013     | 、配管シツウ             |
| 5    | 072K602     | 、配管シツウ             |
| 6    |             | 配管能力算出書            |
| 7    | TC-80049    | 、配管条件書             |
|      |             |                    |
|      |             |                    |



張

1. 当  $\Gamma \cap R$  非空时,  $\Gamma \cap R$  是  $R$  的子集. (因  $\Gamma \cap R \subseteq R$ )

注記  
1. 配座句配は参考値である。

2 階段部の記号はパイプをマイク加工する場所を示す

38

[illegible]



BLOOPHとRELAPの解析モデル比較表

|                | BLOOPH                                                                                                                         | RELAP5/MOD2                                                                                                                                          |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 水力モデルと基礎方程式 | 均質平衡 2 相流モデル<br>気液各相の連続の式 (2 方程式)<br>気液混合のエネルギー式 (1 方程式)<br>気液混合の運動量の式 (1 方程式)<br>ホリウムジャンクションを基本としたSemi-implicit 差分法           | 非均質非平衡 2 流体 モデル<br>気液各相の連続の式 (2 方程式)<br>気液各相のエネルギー式 (2 方程式)<br>気液各相の運動量の式 (2 方程式)<br>ホリウムジャンクションを基本としたSemi-implicit 差分法                              |
| 2. 臨界流モデル      | 水単相 Henry-Fauske モデル<br>2 相 Moody モデル<br>蒸気単相 断熱噴流モデル                                                                          | Ransom と Trapp のモデル                                                                                                                                  |
| 3. 水側熱伝達モデル    | ヘリカル型 (旋回流) の熱伝達率相関式<br>サブクール域 森中山の液相式<br>沸騰域 修正 Schrock-Grossman の式<br>Rohsenow の式<br>膜沸騰域 DNB点と飽和蒸気点をクオリティで補間<br>過熱域 森中山の気相式 | 直管型の熱伝達率相関式<br>Pre-CHF Dittus-Boelter の式、Chen の式、他<br>CHF Biasiの式、修正 Zuber の式<br>Post-CHF Chen の式、<br>Dougall-Rohsenow の式、他<br>凝縮 Dittus-Boelter 式、他 |
| 4. ナトリウム側モデル   | ナトリウム流量変化を境界条件とし、エネルギー式を解く。熱伝達式はHoe の式。                                                                                        | ナトリウム側は解かないで、伝熱管外表面温度分布 (一定) を境界条件とする。                                                                                                               |