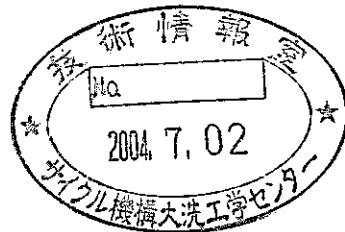


12Cr 鋼伝熱管材の耐ウェスティング特性
—小リーク・ナトリウム—水反応試験—
(技術報告)

2004年3月



核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-Ken 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2004

R100

(KO)

12Cr 鋼伝熱管材の耐ウェステージ特性 —水リーク・ナトリウムー水反応試験—

下山 一仁^{*1)}

要 目

実用化戦略調査研究のナトリウム冷却炉における蒸気発生器水漏れ事故については、プラントの安全の確保や経済性の観点から水リーク対策設備を高度化し、隣接する伝熱管へと破損が次々に進展する破損伝播領域を局限化することが要求されている。現在、従来の知見や既存のツールを用いて水リーク事象の検討・評価を行っているが、12Cr 鋼伝熱管材のナトリウムー水反応に対する腐食損耗、いわゆる耐ウェステージ性についてはこれまで実験データがなく定量評価がなされていない。

そこで、中規模のナトリウムー水反応試験装置 (SWAT-1R) を用いて、12Cr 鋼伝熱管材を試験体としたナトリウムー水反応試験を実施した。ナトリウム温度や伝熱管距離などの実験条件を固定して、水リーク率をパラメータとしたウェステージ率データを取得した。主な結果、成果を以下に示す。

- (1) 過去に行った伝熱管材のウェステージ率データと比較すると、12Cr 鋼伝熱管材は 9Cr 系鋼に対して 1.6 倍以上、2.25Cr-1Mo 鋼に対して 2.7 倍以上の耐ウェステージ性を持つことが把握できた。
- (2) 特に水リーク率の低い領域で耐ウェステージ性が良く、1g/sec 以下では「もんじゅ」過熱器伝熱管材の SUS321 ステンレス鋼より優れる傾向を持つことがわかった。
- (3) 設計評価に用いるため、9Cr 系鋼伝熱管のウェステージ率評価式を基に 12Cr 鋼伝熱管材のウェステージ率評価式を導出した。

今回導出した評価式は 9Cr 系鋼がベースとなっているため、特に水リーク率が低い領域では現実に比べ保守的である。今後の設計評価において、今回行った実験データより低い水リーク領域を設計基準の対象とする場合には、更に実験パラメータ範囲を広げてウェステージデータを取得し、12Cr 鋼伝熱管材単独のウェステージ率評価式を導出する必要がある。

*1) 大洗工学センター 要素技術開発部 熱化学安全試験グループ

March, 2004

Wastage-Resistant Characteristics of 12Cr Steel Tube Material

- Small Leak Sodium-Water Reaction Test -

Kazuhito Shimoyama *1

Abstract

In the water leak accident of a steam generator designed for a sodium cooled reactor in the Feasibility Study, the localization of tube failure propagation by using an advanced water leak detector will be required from the viewpoints of the safety and economical efficiency of the plant. So far, the conventional knowledge and analytical tools have been used in the investigation and evaluation of water leak phenomenon; nevertheless, there was neither test data nor the study of quantitative evaluation on the corrosion behavior, so-called wastage-resistant characteristics, of 12Cr steel tube material in sodium-water reactions.

Wastage tests for the 12Cr steel tube material were conducted in small water leaks by use of the Sodium-Water Reaction Test Rig (SWAT-1R), and the data of wastage rate were obtained in the parameter of water leak rate under the constant sodium temperature and distance between leak and target tubes. The test results lead to the following conclusions:

- (1) The wastage-resistibility of 12Cr steel is 1.6 times greater than that of 9Cr steel and is 2.7 times greater than that of 2.25Cr-1Mo steel.
- (2) The wastage-resistibility of 12Cr steel increases in smaller water leaks; especially in water leak rates of 1 g/sec or less, it is more excellent than that of SUS321 stainless steel used as Monju superheater tube material.
- (3) Based on the correlation of wastage rate for the 9Cr steel, the correlation for the 12Cr steel has been obtained to be used for the evaluation of tube failure propagation.

As the correlation of wastage rate for the 12Cr steel is based on the correlation for the 9Cr steel, it gives enough conservatism in smaller water leaks. To serve in accurately evaluating the tube failure propagation in smaller water leaks, it is necessary to obtain new correlation of wastage rate for the 12Cr steel based on the data in the wide range of water leak rates.

*1) Thermochemistry Safety Engineering Group, Advanced Technology Division,
O-arai Engineering Center

目 次

1. はじめに	1
2. ナトリウムー水反応によるウェステージ現象	2
3. 12Cr 鋼伝熱管材のウェステージ試験条件	4
3.1 水リード率と注水ノズル孔径 (パラメータ)	4
3.2 伝熱管距離 (一定)	4
3.3 ナトリウム温度 (一定)	4
3.4 水・蒸気圧力、温度 (一定)	5
3.5 カバーガス圧力 (一定)	5
3.6 注水時間	5
4. 実験装置と実験方法	6
4.1 実験装置全体系統	6
4.2 試験体	6
4.3 実験計測	7
4.4 実験運転	7
5. ウェステージ実験の結果	9
5.1 実験装置の運転結果	9
5.2 耐ウェステージ性の材料比較	10
5.2.1 各伝熱管材のウェステージ率	10
5.2.2 12Cr 鋼と 9Cr 系鋼伝熱管材の比較	12
5.2.3 まとめと課題	13
6. おわりに	14
7. 謝辞	15
8. 参考文献	16

表リスト

表 3.1 12Cr 鋼伝熱管材ウェステージ試験条件表	17
表 4.1 SWAT-1R 機器主要目	18
表 4.2 12Cr 鋼伝熱管材仕様 化学分析試験	7
表 4.3 12Cr 鋼伝熱管材仕様 引張り試験	7
表 5.1 12Cr 鋼伝熱管材ウェステージ実験の主な結果	19

図リスト

図 3.1 実用化炉 SG の Safety Map と試験条件	20
図 3.2 大型ナトリウム炉蒸気発生器の温度・圧力条件(例)	21
図 4.1 ナトリウム一水反応試験装置 (SWAT-1R) フローシート	22
図 4.2 SWAT-1R 反応容器構造図	23
図 4.3 SWAT-1R 反応容器内部構造図 (試験体組立図)	24
図 4.4 注水管と 12Cr 鋼ターゲット伝熱管の試験体形状	25
図 5.1(1/2)～(2/2) 反応ジェット温度変化とターゲット管圧力変化(破損) 時間	26～27
図 5.2(1/2)～(2/2) 注水実験後の試験体ユニット	28～29
図 5.3(1/2)～(2/2) 注水実験後の 12Cr 鋼ターゲット伝熱管	30～31
図 5.4(1/6)～(6/6) ターゲット管ウェステージ形状の等高線図	32～37
図 5.5(1/2)～(2/2) 注水実験時の水加熱器液面変化	38～39
図 5.6 ウェステージ率と水リーク率による耐ウェステージ性評価	40

1. はじめに

実用化戦略調査研究のナトリウム冷却炉における蒸気発生器（以下、SG）水漏れ（以下、水リーク）事故については、プラントの安全の確保や経済性（財産保護、稼働率）の観点から水リーク対策設備を高度化し、破損伝播（隣接する伝熱管へ次々と破損が進展し、水リークが拡大していく事象）領域を局限化することが要求されている。

現在、従来の知見や既存のツールを用いて水リーク事象の検討・評価を行っているが、この中で伝熱管材のナトリウム-水反応に対する耐ウェステージ（腐食損耗）性については、定量評価のために実験データが不可欠である。ところが、実用化炉 SG の伝熱管候補材である 12Cr 鋼の耐ウェステージ性については実験データが無いため、現段階では 2.25Cr-1Mo 鋼や 9Cr 鋼の値から類推する以外に方法はない。

そこで中規模のナトリウム-水反応試験装置（SWAT-1R）を用いて、12Cr 鋼伝熱管材を試験体としたナトリウム-水反応試験を実施した。水リーク規模はウェステージ率が最も大きい小リーク領域を対象とし、水リーク率をパラメータに 2 回の運転で合計 12 点の実験データを取得した。ナトリウム温度、水・蒸気圧力などプラント条件は過去に行われた 2.25Cr-1Mo 鋼や 9Cr 鋼のリファレンス値を採用して、同条件における 12Cr 鋼伝熱管材の耐ウェステージ性を評価した。

2. ナトリウムー水反応によるウェステージ現象

SG 伝熱管に貫通欠陥が発生した場合、その破損孔から高圧の水・蒸気が液体ナトリウム中に噴出し発熱反応を生じる。反応部は高温となり、反応によって生成される腐食性反応生成物がその周辺を覆う。破損孔（実験では注水ノズル）付近の未反応水域、その外側の高温反応域、更にその外側の腐食性反応生成物高濃度域によって形成される反応火炎を反応ジェットと呼び、その大きさは破損孔径（噴出流量）によって決まる。図 2.1 にその様子を示す。

一方、隣接する伝熱管（実験ではターゲット管）は反応ジェットと高温の反応生成物に曝され、伝熱管表面が損耗されるいわゆるウェステージ現象が発生する。その時の深さ方向（軸方向）への損耗速度（ウェステージ率）が遅いほど耐性が優れている伝熱管材と評価される。

（1）反応ジェットの大きさとウェステージ形態

破損伝熱管と隣接伝熱管間の距離が同じ場合、破損孔径に依存する反応ジェットの大きさによってウェステージ形状が変わる。

図 2.1 は反応ジェットの大きさが違う場合のターゲット管への接触の様子とそのときのウェステージ形態を示したものである。上段は高温反応域がターゲット管に届かないため管外表面が滑らかにウェステージされ、その速度は遅い。中段は高温反応域の中で最も温度の高い部分がターゲット管に接触しその部分だけが集中的に減肉する場合で、ウェステージ率は最も大きい。このような減肉パターンをピット型ウェステージと呼ぶ。下段は反応ジェットが大きいために反応域内部に存在する未反応水がターゲット管に接近または接触しており、ピット型とは反対にジェットの中心部分のウェステージ率が小さく、その周辺が大きくなることでドーナツ型の様相を示す。これをトロイダル型ウェステージと呼び、ピット型に比べややウェステージ率が小さくなる。

このように反応ジェットの大きさ、つまり水リード率の違いによってウェステージ形態とウェステージ率が大きく変わる。』

（2）破損伝熱管と隣接伝熱管の距離

伝熱管の距離もまた水リード率と同様にウェステージ形態を左右する。ある水リード率の反応ジェット高温反応域が丁度ターゲット管に接触する距離の場合はピット型ウェステージ、それより距離が短くなるとトロイダル型ウェステージ、反対に長くなると管外表面が滑らかにウェステージされる。

伝熱管距離はその配列を決める SG 設計による。これまでの設計で最も短い伝熱管間の距離は十数 mm

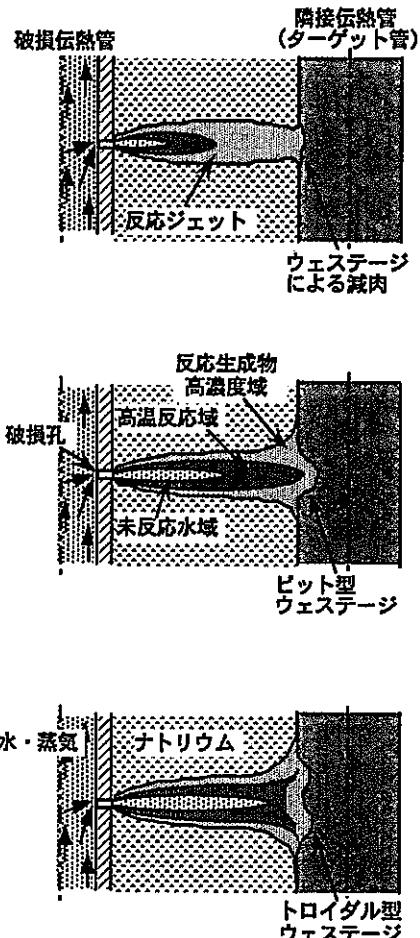


図 2.1 反応ジェットとターゲット
伝熱管のウェステージ形態

程度である。一方、最大は破損孔と直線で結ぶことができる隣接伝熱管との距離で、これまでの設計では100mm以内である。これは、反応ジェットが障害物に接触すると散乱して高温反応域が崩れ、ウェステージ率が小さくなるためである。

同様に水リーク率もある程度大きくなると反応ジェットが隣接伝熱管に邪魔され散乱することから、ウェステージ率も小さくなる。過去の実験で水リーク率が10g/secを超えるような小リークから中リーク領域ではウェステージ率が小さくなる傾向にある。

このように反応ジェットの大きさ、つまり水リーク率とターゲット伝熱管距離（以下、伝熱管距離）は耐ウェステージ性に対して大きな影響を及ぼす。これらのパラメータの他にSG設計、あるいはプラントの運転状態によってもナトリウム温度や水／蒸気圧力・温度条件など、それらの耐ウェステージ性に関する影響度は過去の実験²⁾で比較的小さいことがわかっている。

12Cr鋼伝熱管材のウェステージ試験条件は、これら過去の知見を基に次項で設定する。

3. 12Cr 鋼伝熱管材のウェステージ試験条件

前述した主要パラメータの効果を全て把握し 12Cr 鋼のウェステージ率評価式を導くためには多くの実験データと長い期間を要することになるが、実用化戦略調査研究（フェーズⅡ）の限られた期間の中では困難である。過去の 2.25Cr-1Mo 鋼や 9Cr 鋼の実験では、それらの主要パラメータに関する実験データを全て取得し、詳細な評価がなされている。そこで今回行う 12Cr 鋼の実験では代表的な条件に限定した実験を行い、2.25Cr-1Mo 鋼や 9Cr 鋼の評価結果（ウェステージ率評価式）と比較することで 12Cr 鋼の耐ウェステージ性を評価する。

実験条件のうちナトリウム温度や水・蒸気条件など耐ウェステージ性への影響が小さいパラメータは過去の実験リファレンス値に合わせる。伝熱管距離については前述したようにウェステージ現象では水リーケ率と同じ効果であることから、過去の実験でも伝熱管距離を固定して水リーケ率をパラメータとすることが多く、比較する実験データも豊富である。これらの理由から、12Cr 鋼の実験は水リーケ率を主パラメータとしてそれ以外の条件を固定する。

主な実験条件及び運転条件を表 3.1 の試験条件表に示す。実験は 1 回の運転で 6 ケースの注水ができるユニットを作成し、2 回の実験運転で計 12 点の実験データを採取する。運転ケース毎の実験番号を Run-TW1、Run-TW2 とし、運転の中で行う 6 回の注水を更に枝番号として付ける。

以下にそれぞれの実験条件値とその設定根拠について述べる。

3.1 水リーケ率と注水ノズル孔径（パラメータ）

水リーケ率は、図 3.1 に示す大型炉ヘリカルコイル SG³⁾ の Safety Map 上で、特にウェステージ率が速く設計評価上厳しい 1~10g/sec 前後を対象に、その範囲内で何点か抽出する。

水リーケ率の設定は注水ノズル孔径を変えて行うが、その孔径は過去に行われた注水実験の実績と解析コードによる計算から算出する。実験ではその解析誤差やノズル製作誤差などが原因で予想通りにならないことも多く、第 1 回目の Run-TW1 では目標水リーケ率に対して多めに出る傾向にあった。

パラメータとしては表 3.1 に示すように 9Cr 系鋼の実験でウェステージ率のピークが見られた 6.25 g/sec を中心にして、その前後 1g/sec と 10 g/sec に設定した。

3.2 伝熱管距離（一定）

伝熱管距離については前述したように固定し全実験で統一する。その値は評価のベースとなる 9Cr 系鋼の実験で基準にした 16.2mm をリファレンスとする。この値は外径 31.8mmΦ の伝熱管をピッチ 48mm で配列した場合の最小距離である。

3.3 ナトリウム温度（一定）

2.25Cr-1Mo 鋼や SUS321 ステンレス鋼のウェステージ率評価式はナトリウム温度係数を持つが、水リーケ率や伝熱管距離に比べその効果は小さい。9Cr 系鋼に至ってはナトリウム温度の効果が殆んど無く、定数を持たないウェステージ率評価式としている。

従って、12Cr 鋼の評価ではナトリウム温度はパラメータとせず、9Cr 系鋼で基準にした 480°C とする。

3.4 水・蒸気圧力、温度（一定）

水・蒸気流量が比較的少ない小リーケ領域（0.1g/sec から 10g/sec）の場合、注水時に水加熱器から供給される飽和蒸気がナトリウム中に浸漬された蒸気配管中で過熱され、ナトリウムとほぼ同じ温度の過熱蒸気となる。蒸気圧力は注水ノズル孔径が極端に小さいため圧力損失が大きくノズル出口部で臨界状態になる。実用化炉の設計研究では従来に比べやや高めの蒸気圧力設計となっているが、それよりやや低い過去の蒸気圧力で実験を行っても反応ジェットに影響を与えるものではない。

12Cr 鋼ウェステージ試験の基準となる大型ナトリウム炉蒸気発生器³⁾の温度・圧力条件（例）を図 3.2 に示す。もんじゅ蒸気発生器に比べて高温・高圧指向であるが、上述のとおりウェステージの影響が少ないとことから、2.25Cr 鋼や 9Cr 系鋼と比較するため同条件とする。その蒸気圧力、温度は 12.9MPa·g (132kgf/cm²·G) 、331°C の飽和蒸気で、水加熱器にて設定し注水ノズルに通水する。注水ノズルまでの配管予熱温度は、反応容器にかけて逐々に設定温度を上げて最終的にはナトリウム温度と同じ 480°C とする。この条件でナトリウム中に注水する蒸気密度は 45～65 (kg/m³) の範囲で、図 3.2 の温度圧力条件から算出される実機 SG 出口付近の約 59 (kg/m³) と同等である。

3.5 カバーガス圧力（一定）

反応容器のナトリウムカバーガス圧力は 9Cr 系鋼と同様 0.02～0.05MPa·g とする。実験中はカバーガス圧力自動制御により、発生する水素ガスを収納容器バイパス配管より大気に放出する。また、反応容器と収納容器間のバイパス配管を導通させてカバーガス容積を大きくし、注水実験中の圧力変動を極力抑える。

3.6 注水時間

注水停止条件はターゲット管の 2 次破損までとするが、万一 2 次破損が検知出来ない場合は予想外の注水により試験装置の健全性に影響を及ぼす可能性があることから、2 次破損時間を予測して注水時間を決定する。注水時間に達した場合は 2 次破損に進展する前であっても注水を停止し、それまでの減肉深さを測定してウェステージ率を算出する。予想破損時間は 9Cr 系鋼のウェステージ率から算出した値の約 2 倍に設定した。

4. 実験装置と実験方法

4.1 実験装置全体系統

使用した実験装置はナトリウムー水反応実験装置（SWAT-1R）である。注水を行う反応容器は直径がもんじゅ蒸発器の約1/6スケールの小規模な装置で、ナトリウム循環機能を持たないスタグナント実験用である。図4.1に装置全体系統を記載したフローシートを示す。ナトリウム系はSGを模擬した反応容器（RV）、ダンプタンク（DT）、反応生成物収納容器（RT）とそれらを結ぶ配管系で構成される。その他にガス系、水／蒸気系、電気系、及び計測制御系で構成されている。表4.1に機器主要目を示す。

今回の実験運転では1回の運転中に6回の注水が行えるよう注水配管系統を6系統に改造し、仕切弁6台とヘッダの圧力プローブを設置している。また、ターゲット管にはそれぞれガス配管を接続し、ヘッダに設置する圧力計（PI402）で注水実験時のターゲット管破損を検知する。

（1）反応容器

反応容器の規模は実機SGの1/6縮尺モデルであるが、内部に設置する試験体の伝熱管仕様（直径、厚さ）や配置は実機条件に合わせる。

反応容器の構造を図4.2に示す。内径500mm、高さ約3300mm、内容積0.63m³の円筒容器で、この中に試験体と内部シュラウドが設置される。試験体ユニットは反応容器上部フランジに吊るして反応容器内に取り付ける。反応容器には試験体ユニット全体が覆われるようダンプタンクから約0.4m³のナトリウムを充填する。組立図を図4.3に示す。

（2）その他の主要機器

ダンプタンクは約0.8m³のナトリウムを保有し、その半分を反応容器に供給する。反応容器内でナトリウムー水反応により生成される反応生成物は、高温状態でナトリウムと共にダンプタンクにドレンし、実験終了後の降温でナトリウム中に析出した固形物がタンクの底部に堆積する。次に行われる実験では、反応生成物量を少なくするため予熱温度を低めに設定し飽和溶解度を抑えたナトリウムを反応容器に充填して実験を行う。

反応生成物収納容器（以下、収納容器）は内径1000mm、高さ約2300mm、内容積1.62m³の縦置型円筒容器で、内部にセパレータを有している。セパレータは反応容器から放出される水素ガスとナトリウムや反応生成物などの液体を分離するための機能を有する。なお分離した水素ガスは、収納容器上部の放出配管を経由して点火器で燃焼処理された後、大気へ放出される。

水加熱器は内径約210mm、高さ2350mm、内容積0.07m³の縦置型円筒容器で、最高使用圧力／温度はそれぞれ21.6MPa·G(220kg/cm²G)、450℃である。

4.2 試験体

図4.3に示す注水管とターゲット伝熱管を各6本組み合わせた試験体ユニットを、反応容器上部フランジに固定し、保護スリーブで覆って反応容器内へ挿入する。保護スリーブは反応ジェットが反応容器に損傷を与えないようにするためのものである。注水配管やターゲット伝熱管に接続する配管類、及び温度計測用の熱電対等は、上部フランジに幾つか取り付けられている小フランジから取り出す。

図 4.4 に注水管及びターゲット伝熱管の構造図を示す。水リーク率を決めるリーク孔はノズル台にあけられ、注水管に溶接で固定する。ノズル台とノズル押さえ板の間にはステンレス製の箔を挟み込んで溶接する。この箔は注水直前まで水側へのナトリウム侵入を防ぐ役目を果たし、実験開始時に注水圧力によって破裂させる。ターゲット伝熱管の両端はプラグを溶接し、1/4inch 配管を接続して内部のガス圧力を監視する。注水実験時はこのガス圧力が降下することで伝熱管の破損有無を判断する。実験に用いた 12Cr 鋼伝熱管材仕様を表 4.2、表 4.3 に示す。

表 4.2 12Cr 鋼伝熱管材仕様 化学分析試験

規格:火 SUS410J3TB

化学成分 (Wt. %)															
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Nb	N	W	Cu	B	Sol. Al	
0.07 ~ 0.14	≤ 0.50	≤ 0.70	≤ 0.020	≤ 0.010	≤ 0.50	10.00 ~ 11.50	0.25 ~ 0.60	0.15 ~ 0.30	0.04 ~ 0.10	0.040 ~ 0.100	1.50 ~ 2.50	0.30 ~ 1.70	0.0005 ~ 0.005	≤ 0.040	

表 4.3 12Cr 鋼伝熱管材仕様 引張り試験

規格	引張強さ (N/mm ²)	0.2%耐力 (N/mm ²)	伸び (%)	
			11号又は12号試験片	縦方向
火 SUS410J3TB	≥620	≥400		≥20

備考: 厚さ 8mm 未満の管で 12 号試験片を用いた場合、伸びの最小値は厚さ 1mm 減ずる前に上表の伸びの値より 1.5% 減じた値とする。

4.3 実験計測

主な実験計測は、注水時にナトリウム-水反応が生じていることを確認するための熱電対、及びターゲット管の破損を検知するための圧力計である。実験後計測では、破損伝熱管の減肉部ウェスティング深さ測定と破損孔径測定を実施する。

実験装置の運転・制御に係わるプロセス温度、圧力等のうち、水リーク率を算定するため水加熱器圧力、温度、液面計データを評価に用いる。また注水に用いるための水加熱器内部保有水の充填量とドレン量は、水リーク率算出のための参考とする。

4.4 実験運転

ナトリウム約 0.4 m³ を充填した反応容器の液面下約 1m 付近で注水実験を行う。SWAT-1R はナトリウム循環機能を持たないため、スタグナントなナトリウム中に注水する。

カバーガス部は反応容器と収納容器を結ぶ放出系バイパス配管を導通させ内容積を大きくすることで水素ガス発生による圧力上昇を緩和させる。実験中はカバーガス圧力自動制御により、発生する水素

ガスを収納容器バイパス配管より大気に放出させ、約 600°C に加熱した点火ヒータで燃焼させる。

万一の急激な圧力上昇による試験装置の破損等を回避するため、反転ナイフ式のラプチャディスクが常設されている。今回の実験では、破裂設定圧力を反応容器を 0.3MPa、収納容器を 0.15MPa とした。

注水実験はナトリウム系、水・蒸気系とも温度・圧力条件が整った段階で WV501 を開閉することで行う。注水配管 6 系統の切替弁 (W-1~W-6) と注水ダブル弁として設置された WV502 は、万一弁座からの蒸気漏えい等の影響による予定外注水を防止するため実験直前に「開」とする。水加熱器出口の WV-1 は予熱開始前に「開」とし、実験期間全てその状態で維持する。

これらの操作は、全て制御室に設置されている監視・制御装置 (astnex) 及び制御盤を使用して行う。

注水停止条件は、①試験条件で定められた注水時間、②ターゲット管の破損、③反応容器外壁温度「高」の 3 項目で、いずれかを満たした時点で注水停止となる。①、②は運転員が判断し手動停止するが、③はインターロック機能が働き自動停止となる。

実験終了後は、反応容器や収納容器内のナトリウムをダンプタンクヘドレンし、反応容器より試験体を取り外し解体・洗浄した後、破損伝熱管の調査（材料検査、ウェステージ測定）を実施する。

5. ウェステージ実験の結果

Run-TW1、Run-TW2 の 2 回の運転で行った計 12 回のウェステージ実験結果を表 5.1 に示す。この中には実験装置の運転プロセスデータ、実験前後の試験体観察結果、及び 12Cr 鋼と 9Cr 鋼の比較結果などをまとめた。

5.1 実験装置の運転結果

ナトリウム温度、水／蒸気温度・圧力（水加熱器温度・圧力）の運転条件は目標に対して誤差 1%以内で設定した。図 5.1(1/2), (2/2) に注水実験時の反応ジェット温度変化とターゲット管内の圧力変化（破損）時間を、図 5.2(1/2), (2/2) に実験後のターゲット管と注水管が取り付けられている試験体ユニットを示す。

(1) 反応ジェットの温度

反応ジェット温度を測定する熱電対は、反応ジェット形状や進行方向を邪魔しないようその中心から約 15mm 外側に離し、更にターゲット管から 2~5mm 程度浮かせて設置した。図 5.2 に示す試験体ユニットのターゲット管中心付近に見える 2 本の熱電対がそれに相当する。仕様は直径 1mmΦ の K 型シーズ熱電対 (JIS クラス 2) で、シーズ長さ 5000mm である。

図 5.1 の温度データでは、約 480°C (初期ナトリウム温度) から急激に立ち上がり振動しながら数百度上昇している部分が注水期間である。最高到達温度は水リーキ率の大きさによって異なり、5g/sec 以下の比較的少ない水リーキ率では 600~700°C の温度上昇に留まるが、10g/sec 以上になると 800°C を超える。反応温度が最も高かったケースは Run-TW2-5 で、そのピーク温度は 1000°C を超えた。

(2) 注水配管フィルタの圧力損失

図 5.1 の反応ジェット温度で Run-TW1-3 と Run-TW1-4 は、水リーキ率が比較的大きいにも関わらず反応温度が低い。これは注水弁と注水ヘッダ途中に設置したフィルタの目詰まりが関係している。フィルタの目詰まりは、実験で注水停止直後に行う配管中の残留蒸気ブロー操作により把握することができた。本来、このフィルタは水系配管の内面に存在する錆など固形物による注水ノズル孔閉塞を防ぐことが目的で設置されているが、予想を上回る量の固形物等がフィルタを詰まらせ圧力損失を招くことになった。

圧力損失によって反応ジェットの流速が低下することになるが、圧力損失割合を定量的に把握することができないことからウェステージに対する影響度評価は困難である。しかしながら、表 5.1 に示すように注水ノズル孔径に対する水リーキ率が比較的小さいこと、及び予想時間内で 2 次破損しなかったことから、この 2 ケースは他の実験データより保守的であることが推定できる。実験データの取扱としては保守的であるということを考慮して取り扱う。

(3) ターゲット管の 2 次破損

図 5.1 には反応ジェット温度のほかに、ターゲット伝熱管の破損を検知するターゲット管内圧力も併記した。圧力が 0.8MPa から約 0.35MPa に降下している部分が 2 次破損した時間で、圧力降下が無い 2 ケースは 2 次破損していないことを表している。

2 次破損したケースの損耗深さ (t) は、実験前に測定した伝熱管の初期肉厚 (t_0) と同じである。2 次破損していないケースは、レーザーを用いたウェステージ測定装置でその損耗深さを計測し、その最大値を損耗深さとして表 5.1 に記載した。

図 5.3 (1/2), (2/2) に実験後のターゲット管写真を示しており、その中心部分で縦んでいる部分がウェステージ箇所である。そのウェステージ形態を把握するため、ウェステージ測定装置を用いて損耗深さを測定し等高線処理したものを図 5.4 (1/6) ~ (6/6) に示す。図中のウェステージ変位量が伝熱管表面を基準にした損耗深さを示す。水リーク率が大きいほどウェステージ範囲が広く、中心よりその周辺での損耗が多いトロイダル型ウェステージとなっている。それ以外はピット型ウェステージの形態を示し、その割合は半々である。平均水リーク率で整理すると、5g/sec 以下でピット型、10g/sec 以上でトロイダル型、5~10g/sec では両者が混在する。但し、今回のケースは伝熱管距離 16.2mm だけのデータで、それが変わると上述した水リーク率とウェステージ形態の関係も変化する。

(4) 注水時間とウェステージ率

注水時間 (T) は注水を開始するための注水弁 (WV501) を「開」としてからターゲット管が破損 (圧力低下) するまで、若しくは破損に至らないケースについては注水弁を「閉」とするまでの時間である。この注水時間 (T) でウェステージ部の最大損耗深さ (t) を割ったものがウェステージ率 (η) である。

(5) 平均水リーク率

平均水リーク率は実験でナトリウム中に注入した全注水量を注水時間で割ったものである。

図 5.5 (1/2), (2/2) に注水時の水加熱器液面計変化を示す。この液面計は差圧式を採用しており、その差圧を 1~5V の電圧に変えて記録する。この電圧値と注水量の関係は水加熱器寸法と事前の液面校正結果により把握でき、ここでは 1mVあたり 9cc に相当する。

注水直後の上下振動は、最初の降下が何も入っていない空の注水配管を満水にするためのもので、その後の上昇は配管中の水／蒸気がナトリウムによって加熱され体積膨張したことによる逆流が原因である。これらの不安定時期を除いて一定の変化を示す時間帯の変化率から平均水リーク率を求める。その値は表 5.1 の平均水リーク率 (G) に記載する。

実験後に行った注水ノズル孔径測定では実験前と変わらない結果が得られており、実験中注水ノズル孔自身が拡大すること無く一定の水リーク率であったことが裏付けられる。この平均水リーク率 (G) と注水時間 (T) から得られる実験中の全注水量合計と、6 ケース実施した実験運転後の水加熱器残水量測定結果から算出した全 6 ケースの注水量合計は数%以内の差でほぼ一致している。

5.2 耐ウェステージ性の材料比較

12Cr 鋼の耐ウェステージ性は、ウェステージ率と水リーク率の関係を示した図 5.6 で評価する。図中の実験データは 12Cr 鋼と比較対照の 9Cr 系鋼のプロットで、2.25Cr-1Mo 鋼と SUS321 はベストフィット曲線を示す。実験条件はナトリウム温度：480°C、伝熱管距離：16.2mm のリファレンス値で合わせ、水リーク率のみを 0.1~10g/sec の範囲で変化させる。

5.2.1 各伝熱管材のウェステージ率

(1) 9Cr 系鋼

図 5.6 の白抜きマークは 9Cr 系鋼の実験データで、Mod. 9Cr-1Mo 鋼、9Cr-2Mo 鋼、9Cr-1Mo-Nb-V 鋼の 3 鋼種を示しており、それらのデータを最小二乗法により整理し、以下の (5.1) 式の形で実験式を導出している。⁴⁾

(9Cr 系鋼)

$$W_R = 0.08 \cdot \exp \{-0.265 \cdot (\ln(G/6.25))^2\} \quad \dots \dots \dots \text{ (5.1) 式}$$

ここで、 W_R : ターゲット・ウェステージ率 (mm/sec)、(伝熱管距離は 16.2mm 限定)

G : 平均水リーケ率 (g/sec)

この実験式のナトリウム温度は約 480°C である。図中の実線 (細) が (5.1) 式に相当し、ウェステージ率と水リーケ率は両対数グラフ上で放物線に近い関係にある。(5.1) 式から求められる 9Cr 系鋼の最大ウェステージ率は水リーケ率が 6.25g/sec のとき 0.08mm/sec である。

(5.1) 式は伝熱管距離 16.2mm に限定したものであるが、9Cr 系鋼では (5.1) 式を一般化するため伝熱管距離を変えた実験も行っている。伝熱管距離の依存性も含めた実験式を以下に示す。

(9Cr 系鋼)

$$W_R = (3.63/L^{1.37}) \cdot \exp \{-0.265 \cdot (\ln(G/6.25))^2\} \quad \dots \dots \dots \text{ (5.2) 式}$$

ここで、 L : 伝熱管距離 (16.2mm $\leq L \leq$ 62.5mm)

(2) 2.25Cr-1Mo 鋼及び SUS321

図 5.6 にはもんじゅ SG 伝熱管材である 2.25Cr-1Mo 鋼と SUS321 の評価式から求める実験曲線も示す。図中的一点差線、二点差線で示したそれらのベストフィット式は以下の通りである。⁵⁾

(2.25Cr-1Mo 鋼)

$$W_R = (4410/L) \cdot \exp \{-0.255 \cdot (\ln(G/5.12))^2 - 5460/T_{Na}\} \quad \dots \dots \dots \text{ (5.3) 式}$$

(SUS321)

$$W_R = (192500/L^{2.3}) \cdot \exp \{-0.287 \cdot (\ln(G/3.93))^2 - 7180/T_{Na}\} \quad \dots \dots \dots \text{ (5.4) 式}$$

ここで、 T_{Na} : ナトリウム温度 (K)

これらの式ではナトリウム温度の変数を持っており、図中ではナトリウム温度を 480°C として示している。因みに 9Cr 系鋼の (5.2) 式にナトリウム温度の項が存在しないのは、実験で行った範囲のナトリウム温度では依存性が認められなかつたためである。

この図から伝熱管材料の耐ウェステージ性としては、以下のような関係になる。

2. 25Cr-1Mo 鋼 < 9Cr 系鋼 < SUS321

(3) 12Cr 鋼伝熱管材のウェステージ率

図 5. 6 に 12Cr 鋼伝熱管材の実験データ 12 点を●で示した。5. 1 項に記述した保守データも含まれており、約 5g/sec と約 10g/sec にあるそのデータは他に比べてウェステージ率がやや低めである。

9Cr 系鋼のウェステージ率と比較すると、12Cr 鋼は全体的に優れており特に水リーク率が 5g/sec を下回る低い領域ではその差がより大きくなつて耐ウェステージ性が強いことを示している。

5. 2. 2 12Cr 鋼と 9Cr 系鋼伝熱管材の比較

(1) 9Cr 系鋼ウェステージ率の保守評価式

12Cr 鋼の実験データは点数が少なく取得したデータの水リーク率範囲が狭いことから、単独で最小二乗法を用いた実験式を導出することは難しい。ここでは 9Cr 系鋼の実験データで最も厳しいものを用いてウェステージ率評価式 (5. 2) 式を保守評価用に見直し、それと 12Cr 鋼の実験データを比較する。以下に見直した保守評価式を示す。

(9Cr 系鋼保守評価式)

$$W_R = (4.77/L^{1.37}) \cdot \exp \{-0.265 \cdot (\ln(G/6.25))^2\} \quad \dots \dots \dots \quad (5.5) \text{ 式}$$

放物線の形を変えずウェステージ率だけを保守側に見直したこの評価式は、図 5. 6 中では実線（太）で示しており、9Cr 系鋼実験データ全てが包絡されている。

(2) 9Cr 系鋼保守評価式と 12Cr 鋼実験データの比較

9Cr 系鋼保守評価式 (5. 5) 式を用いて 12Cr 鋼各実験の平均水リーク率に対するウェステージ率を算出し、12Cr 鋼実験データのウェステージ率と比較したものを表 5. 1 に示す。この結果、9Cr 系鋼に対して 1.6~4.3 倍の耐ウェステージ性を持つことがわかった。この中でピット型のウェステージ形態を示す 5g/sec 以下で特に耐性が優れており 3~4 倍、それより大きい水リーク率になると 2.0 倍前後になる。但し、5. 1 項で述べた保守データは除いている。

また、(5. 3) 式に示す 2. 25Cr-1Mo 鋼の評価式と比較すると、12Cr 鋼伝熱管材は 2.7 倍以上の耐ウェステージ性を持つことが把握できる。ただこの評価式はベストフィットであるため、実際にはもっと優れていることが言える。

(3) 12Cr 鋼ウェステージ率評価式の導出

今回の実験では水リーク率の幅広い範囲でウェステージデータを取得していないことから、12Cr 鋼としてウェステージ率実験評価式を単独で導出することができなかつた。

しかし、9Cr 系鋼保守評価式を基準に 12Cr 鋼実験データで最も厳しいウェステージ率データを用いて暫定的に導出した 12Cr 鋼のウェステージ率評価式を以下に示す。

(12Cr 鋼評価式)

$$W_R = (2.95/L^{1.37}) \cdot \exp \{-0.265 \cdot (\ln(G/6.25))^2\} \quad \dots \dots \dots \quad (5.6) \text{ 式}$$

この式は、9Cr 系鋼保守評価式 (5.5) 式を 1.6 倍したもので、図 5.6 には点線で示す。

5.2.3 まとめと課題

今回の実験で水リード率 1g/sec 以下のデータを取得していないのは、実験装置の水系設備が低水リード率に対応していなかったためである。図 5.6 に示すように水リード率が小さくなるほど 12Cr 鋼の耐ウェステージ性が優れていることから、(5.6) 式に示す 12Cr 鋼評価式では数 g/sec 以下の低水リード領域ではあまりにも保守的になりすぎて現実的ではない。(5.6) 式は 12Cr 鋼のウェステージデータが拡充されるまでのあくまでも暫定な式として取り扱いたい。

また、ウェステージを受けた伝熱管材の目視観察では、定性的ではあるが損耗部分が全体的に鋭く伝熱管材として硬い感じを受ける。今回の実験では伝熱管材の破壊検査を実施していないため、ウェステージ領域の大きさや拡大孔形状などの材料検査データは取得していない。今後は伝熱管材料検査などを通してウェステージ率データと共に耐ウェステージ性を評価するアプローチをしたい。

6. おわりに

実用化戦略調査研究のナトリウム冷却炉における SG 伝熱管候補材である 12Cr 鋼の耐ウェステージ性を評価するため、中規模のナトリウム-水反応試験装置 (SWAT-1R) を用いて小リーク領域のナトリウム-水反応ウェステージ試験を実施した。

計 12 回の注水実験で得た実験データは 9Cr 系鋼伝熱管材に対して 1.6 倍以上、2.25Cr-1Mo 鋼に対して 2.7 倍以上の耐ウェステージ性を持つことがわかった。

今回の実験では水リーク率の幅広い範囲でウェステージデータを取得していないことから、12Cr 鋼としてウェステージ率実験評価式を単独で導出することができなかったが、12Cr 鋼実験データの中で最も厳しいウェステージ率データと 9Cr 系鋼保守評価式を用いて、暫定的に実験評価式を導出した。12Cr 鋼のウェステージ率評価式を以下に示す。

(12Cr 鋼評価式)

$$W_R = (2.95/L^{1.37}) \cdot \exp \{-0.265 \cdot (\ln(G/6.25))^2\}$$

ここで、 W_R : ターゲット・ウェステージ率 (mm/sec)

L : 伝熱管距離 (mm)

G : 平均水リーク率 (g/sec)

また、この評価を行うために、過去 9Cr 系鋼の評価式として用いてきたベストフィットの実験式を、保守評価式として見直した。以下にその保守評価式を示す。

(9Cr 系鋼保守評価式)

$$W_R = (4.77/L^{1.37}) \cdot \exp \{-0.265 \cdot (\ln(G/6.25))^2\}$$

図 5.6 に示すように 12Cr 鋼は水リーク率の低い領域で耐ウェステージ性に優れており、1g/sec 以下では SUS321 伝熱管材より耐ウェステージ性が上回る可能性もある。今回取得した実験データに加え、更に広範囲の水リーク率でウェステージデータを取得し、12Cr 鋼伝熱管材単独のウェステージ率評価式を導出することも必要であろう。

また、ウェステージを受けた伝熱管材の目視観察では、定性的ではあるが損耗部分が全体的に鋭く伝熱管材として硬い感じを受ける。今回の実験では伝熱管材の破壊検査を実施していないため、ウェステージ領域の大きさや拡大孔形状などの材料検査データを取得していないが、今後は伝熱管材料検査などを通してウェステージ率データと共に耐ウェステージ性を評価し、材料強度とウェステージの関係を定量化できるよう検討することも必要である。

7. 謝 辞

本報告書の執筆にあたり多くの方々のご協力を頂きました。実験の計画、データ評価に関してはシステム技術開発部 FBR システムグループの木曾原直之氏にご協力頂きました。実験の実施、データ収録にあたっては熱化学安全試験グループの鈴木和右氏をはじめとする東興機械工業(株)の皆様の多大なご協力を頂きました。また実験データの処理・解析では二神敏氏、原子力システム(株)の小野功氏にご協力を頂きました。また全体的なアドバイザーとして宮原信哉グループリーダー、浜田広次サブグループリーダーにご助言を頂きました。この場を借りて謝意を表します。

8. 参考文献

- 1) 鐘ヶ江直道, 他, “ウェステージに対する距離の効果に関する試験とその検討およびリーク鋼拡大（セルフウェステージ）に関する一考察—小リーク・ナトリウム－水反応試験研究 第7報—”, PNC TN941 76-27 (1976)
- 2) 宇佐美正行, 他, “高クロム系鋼 SG 伝熱管材のウェステージ特性—小リーク・ウェステージ試験—”, PNC TN9410 88-129 (1988)
- 3) 島川佳郎, 他, “Na 冷却大型炉設計研究”, JNC TY9400 2002-007 (2002)
- 4) 宇佐美正行, 他, “高クロム系鋼の耐ナトリウム－水反応”, 日本原子力学会誌, Vol. 33, No. 4, p. 363 ~372 (1991)
- 5) 下山一仁, 他, “高クロム系 SG 伝熱管材溶接部のウェステージ特性—微小リーク、小リーク・ウェステージ試験—”, PNC TN9410 91-288 (1991)

表3.1 12Cr鋼伝熱管材ウェスティング試験条件表

試験条件項目	単位	TW1-1	TW1-2	TW1-3	TW1-4	TW1-5	TW1-6	TW2-1	TW2-2	TW2-3	TW2-4	TW2-5	TW2-6
伝熱管材質、寸法	mm	12Cr鋼(火SUS410J3TB ^{*1})、31.8φ × 3.3t(公称)											
伝熱管-管距離	mm	16.2mm											
目標水リーク率	g/sec	1.0	1.0	6.0	6.0	10.0	10.0	0.7	0.7	1.0	1.0	6.0	10.0
注水ノズル孔径 ^{*2}	mm φ	0.4	0.4	1.0	1.0	1.2	1.2	0.25	0.25	0.3	0.3	0.7	1.0
水加熱器温度	°C	331											
水加熱器圧力	MPa·g	12.9											
水系配管温度 ^{*3}	°C	~ 480											
ナトリウム温度	°C	480											
カバーガス圧力 ^{*4}	MPa·g	0.02 ~ 0.05											
注水時間 ^{*5}	sec	300	300	210	210	90	90	300	300	210	210	90	90
備考													

*1:発電用火力設備に関する技術基準

*2:ここでのノズル孔径は使用するドリルの径を示す。実際の孔径はドリル径より若干大きめになる。

*3:反応容器入口付近はナトリウム温度と同じ480°Cとするが、水加熱器廻りの配管は温度差を考慮して設定。

*4:収納容器と導通させることでカバーガス容積を大きくし、カバーガス圧力の変化を少なくする。

*5:2次破損時間を9Cr鋼ウェスティング率実験式で得た値の約1.3倍~2.0倍に仮定して注水時間を設定。

表4.1 SWAT-1R機器主要目

機器名	単位	反応容器 (RV)	ダンプタンク (DT)	反応生成物 収納容器 (RT)	水加熱器 (WH)
型 式	—	豎置円筒	横置円筒	豎置円筒	豎置円筒
最高使用圧力	MPa·G (kg/cm ² G)	1.97 (20)	0.971 (9.9)	0.971 (9.9)	21.57 (220)
最高使用温度	°C	580	555	555	450
胴径（内径）	mm	500	1000	1000	209.4
全 長	mm	3334	1732	2257	2350
胴 厚 さ	mm	12	12	12	29
材 質	—	SUS304	SUS304	SUS304	SFVAF11A
内 容 積	m ³	0.63	1.23	1.62	0.07
ナトリウム インベントリ	m ³	0.4	0.8	—	—
適用法規	—	第二種圧力容器	第二種圧力容器	第二種圧力容器	第一種圧力容器

表5. 1 12Cr鋼伝熱管材ウェステージ実験の主な結果

試験条件項目		記号	Run-TW1-1	Run-TW1-2	Run-TW1-3	Run-TW1-4	Run-TW1-5	Run-TW1-6	Run-TW2-1	Run-TW2-2	Run-TW2-3	Run-TW2-4	Run-TW2-5	Run-TW2-6
実験結果	水加熱器温度(°C)	T _{WH}	330	331	330	331	331	331	331	331	331	331	331	331
	水加熱器圧力(MPa/g)	P _{WH}	12.8	12.9	12.9	12.9	12.9	12.8	12.8	12.8	12.9	12.8	12.8	12.8
	ナトリウム温度(°C)	T _{Na}	480	480	484	483	485	481	478	479	483	480	480	479
	試験体伝熱管肉厚(mm)	t ₀	3.63	3.60	3.61	3.54	3.57	3.52	3.63	3.62	3.72	3.61	3.73	3.65
	2次破損の有無	-	有	有	無	無	有	有	有	有	有	有	有	有
	損耗深さ(mm)	t	3.63	3.60	3.024	3.206	3.57	3.52	3.63	3.62	3.72	3.61	3.73	3.65
	注水時間(sec)	T	86.4	55.2	90.0	90.0	71.1	71.9	216.9	195.1	111.6	98.6	84.6	68.7
	ウェステージ率(mm/sec)	W _R =t/T	0.0420	0.0652	0.0336	0.0356	0.0502	0.0490	0.0167	0.0186	0.0333	0.0366	0.0441	0.0531
	平均水リーク率(g/sec) ^{※2}	G	6.79	8.53	5.36	9.61	9.49	13.49	1.89	1.98	3.77	3.53	16.15	15.22
	全注水量(g) ^{※2}	-	586.7	470.9	482.4	864.9	674.7	969.9	409.9	386.3	420.7	348.1	1366.3	1045.6
	実験シリーズ毎の全注水量(g) ^{※3}	-	4049						3977					
	給水残水量から算出した実験シリーズ全注水量(g) ^{※4}	-	約4117						約4112					
	実験後注水ノズル孔径測定(mm ϕ)	-	0.41	0.41	1.06	1.05	1.21	1.21	0.25	0.26	0.31	0.32	0.72	1.01
	9Cr系鋼(保守評価)ウェステージ率(mm/sec)	W _R (9Cr)	0.1048	0.1023	0.1043	0.1000	0.1003	0.0898	0.0719	0.0740	0.0981	0.0963	0.0827	0.0851
	9Cr系鋼／12Cr鋼(保守評価)	-	2.5	1.6	3.1	2.8	2.0	1.8	4.3	4.0	2.9	2.6	1.9	1.6

※ 注水開始直後はナトリウム加熱による体積増加が影響して、水加熱器液面が安定しないことから、注水開始からある程度経過した後の安定した液面計変化率から水リーク率を算出した。

※2 G: 平均水リーク率 × T: 注水時間

※3 TW1及びTW2の実験シリーズ毎注水量の合計。

※4 実験シリーズ(TW1及びTW2:各6回毎)で注水した全量は、実験前後の給水量と残水量の差から算出する。但し、注水実験直後に急速ブローする配管内残水量はその内容積から約110g/回として差し引く。

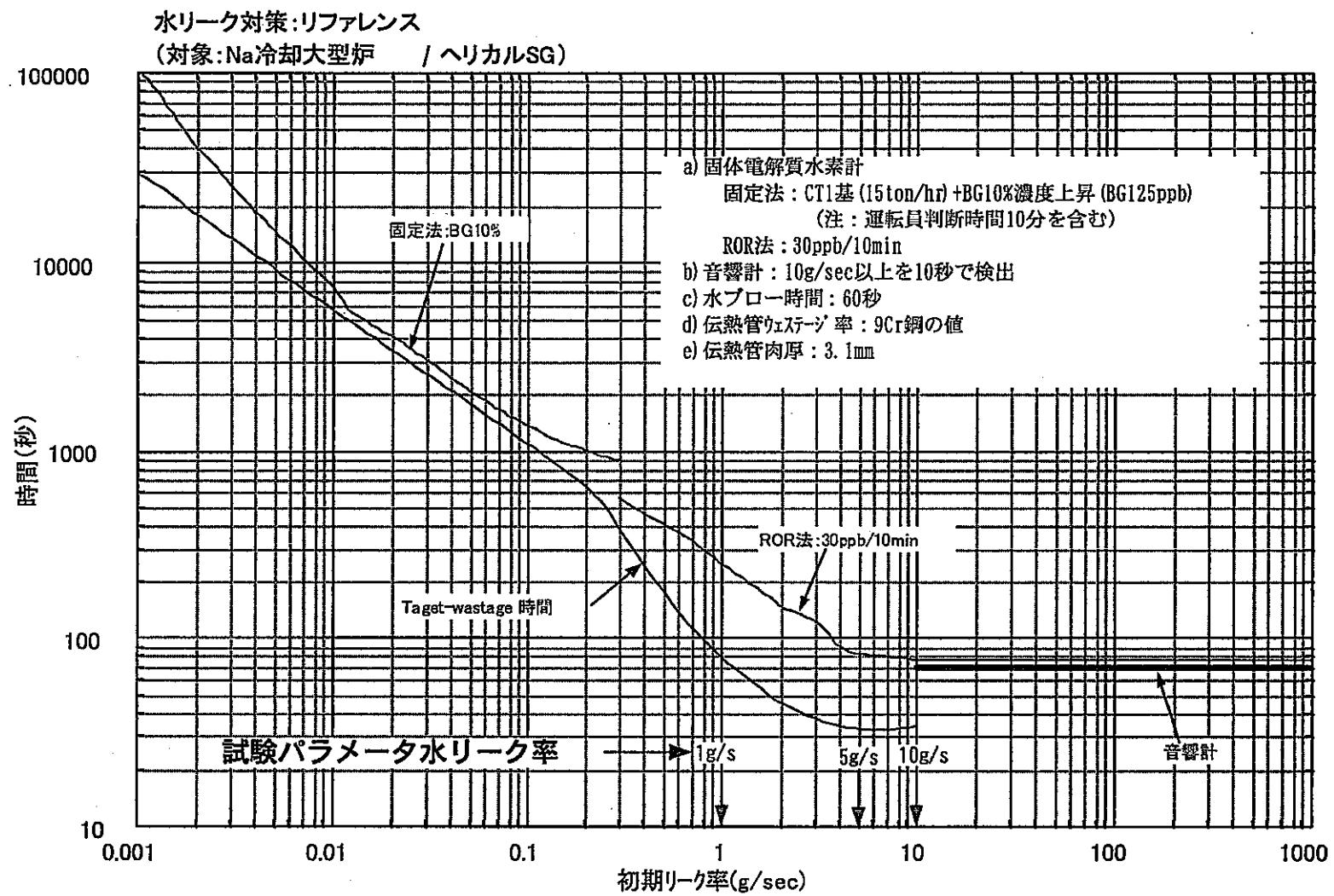


図3.1 実用化炉SGのSafety Mapと試験条件

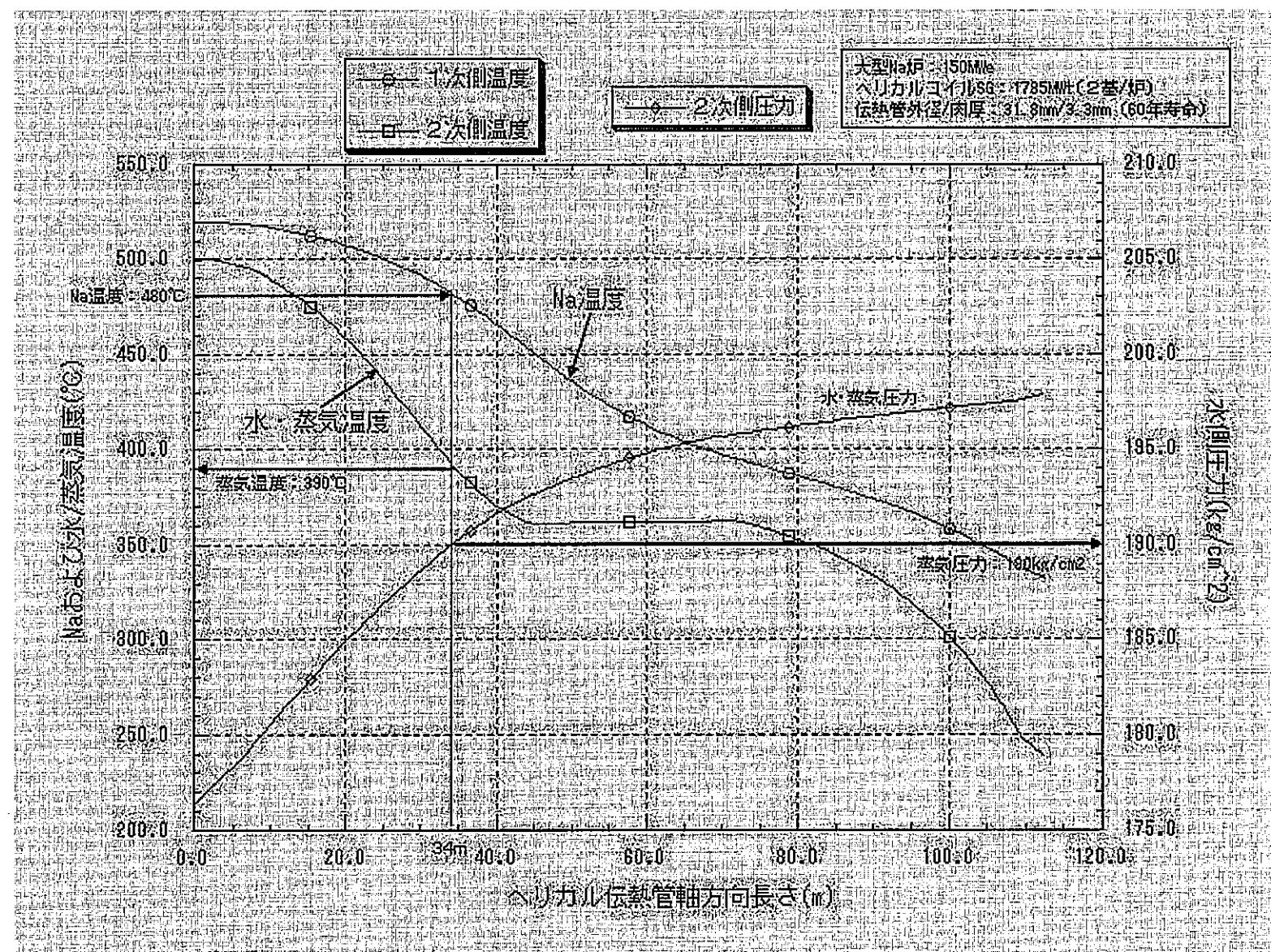


図 3.2 大型ナトリウム炉蒸気発生器の温度・圧力条件（例）

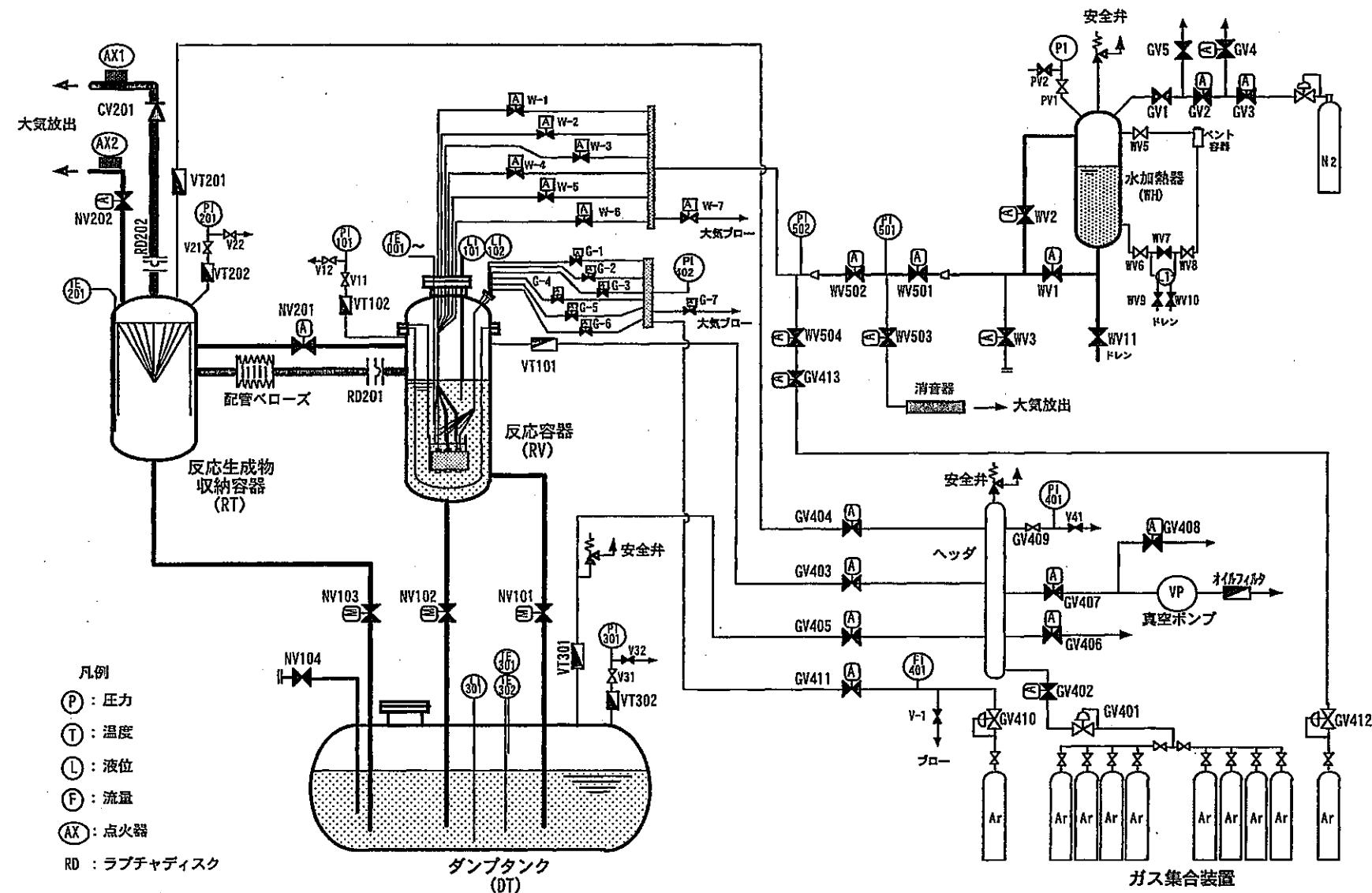
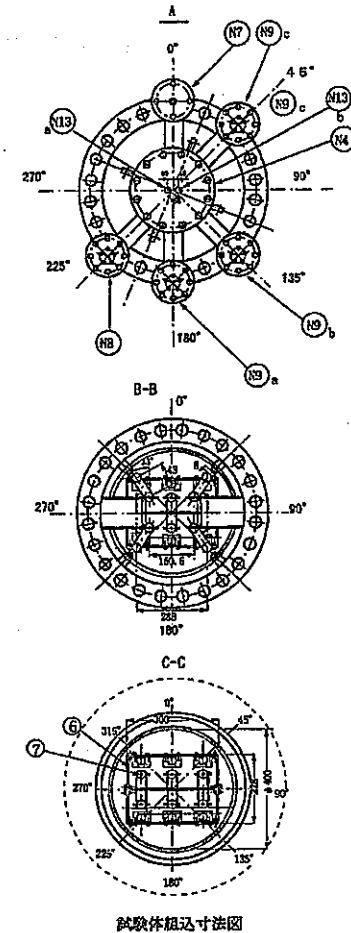
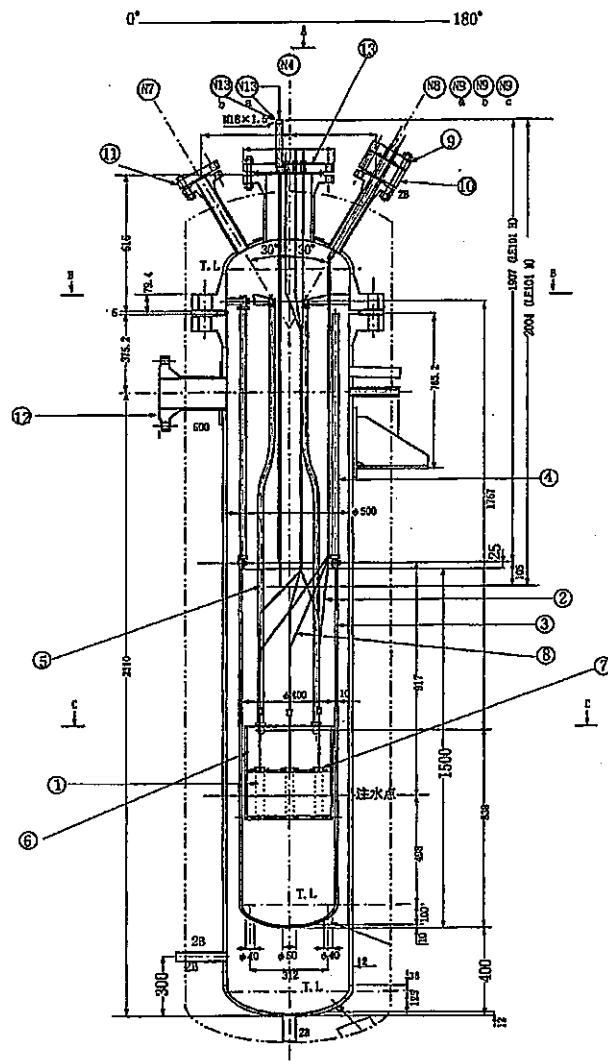


図 4.1 ナトリウム-水反応試験装置 (SWAT-1R) フローシート



部品リスト					
部品番号	名 称	規格	材質	寸 法	数量
1	計量管	25 (D)	真鍮	1 SUS304F	49 FLG
2	排水管	1 1/2"	1 SUS304F	49 FLG	1
3	給水栓取出し管台(手廻管台)	25	1 SUS304F	49 FLG	1
4	給水栓取出し管台	25	3 SUS304F	49 FLG	3
5	給水栓取出し管台	25	3 SUS304	おどり式 (M16x1.5)	3

部品リスト			
部品番号	名 称	規格	材 質
1	計量管	6 SUS304	1/4inch ($\phi 6.35 \pm 0.5$ mm)
2	排水管	6 SUS304	1/4inch ($\phi 6.35 \pm 0.5$ mm)
3	シラウド	3 SUS304	
4	シラウド取り金具	4 SUS304	16 sch50
5	被膜作成り金具	4 SUS304	16 sch50
6	試験用ニット	1 SUS304	b7ms
7	ゲージケット取付部	6 SUS304	1/4inch ($\phi 6.35 \pm 0.5$ mm)
8	ガス放泄配管	6 SUS304	1/4inch ($\phi 6.35 \pm 0.5$ mm)
9	25flsフランジ	4 SUS304GP-AST	ANSI 400LB リングジョイント既
10	計量用遮板ノズル	4 SUS304	16,19mm
11	1 1/2"フランジ	1 SUS304	
12	CBフランジ	1 SUS304	ANSI 400LB リングジョイント既
13	CB圧止フランジ	1 SUS304	ANSI 400LB リングジョイント既

図4.2 SWAT-1R反応容器構造図

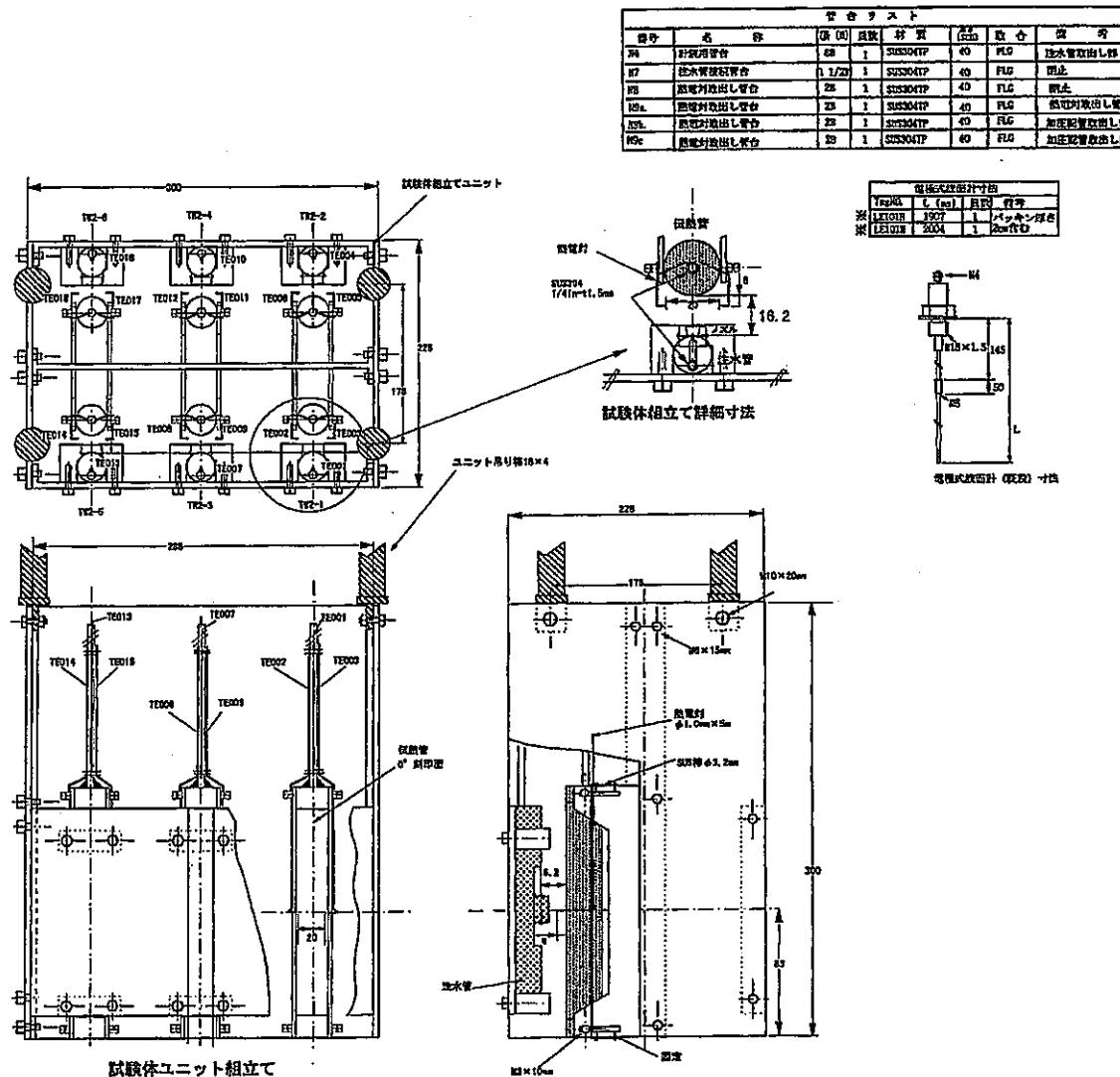
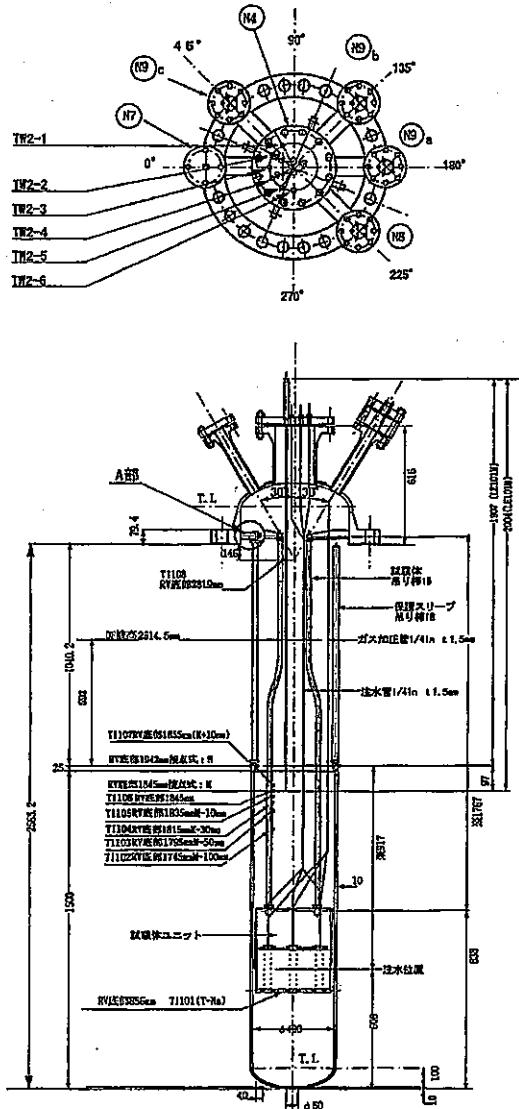
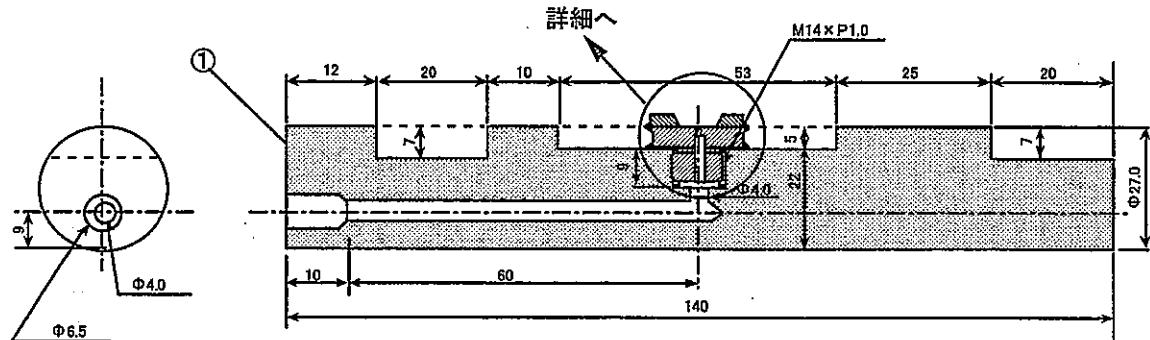
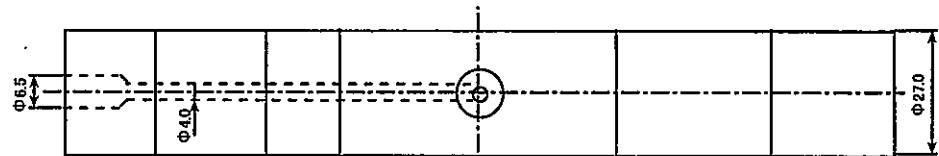
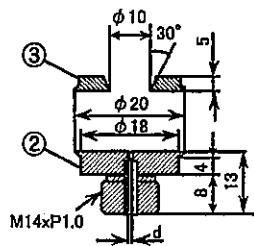
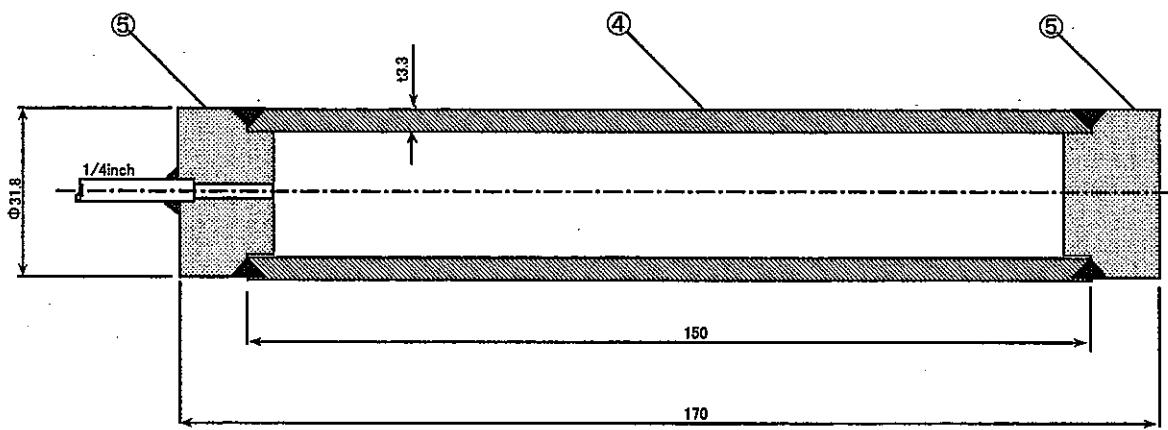


図4.3 SWAT-1R反応容器内部構造物(試験体組立図)

	部品名	材質	備考
①	注水管	SUS304	
②	注水ノズル台	SUS304	
③	注水ノズル押さえ板	SUS304	
④	12Cr鋼伝熱管	HCM12A	火SUS410J3TB
⑤	伝熱管エンドプラグ	SUS304	



(注水管)



(ターゲット伝熱管)

単位:mm

図 4.4 注水管と 12Cr 鋼ターゲット伝熱管の試験体形状

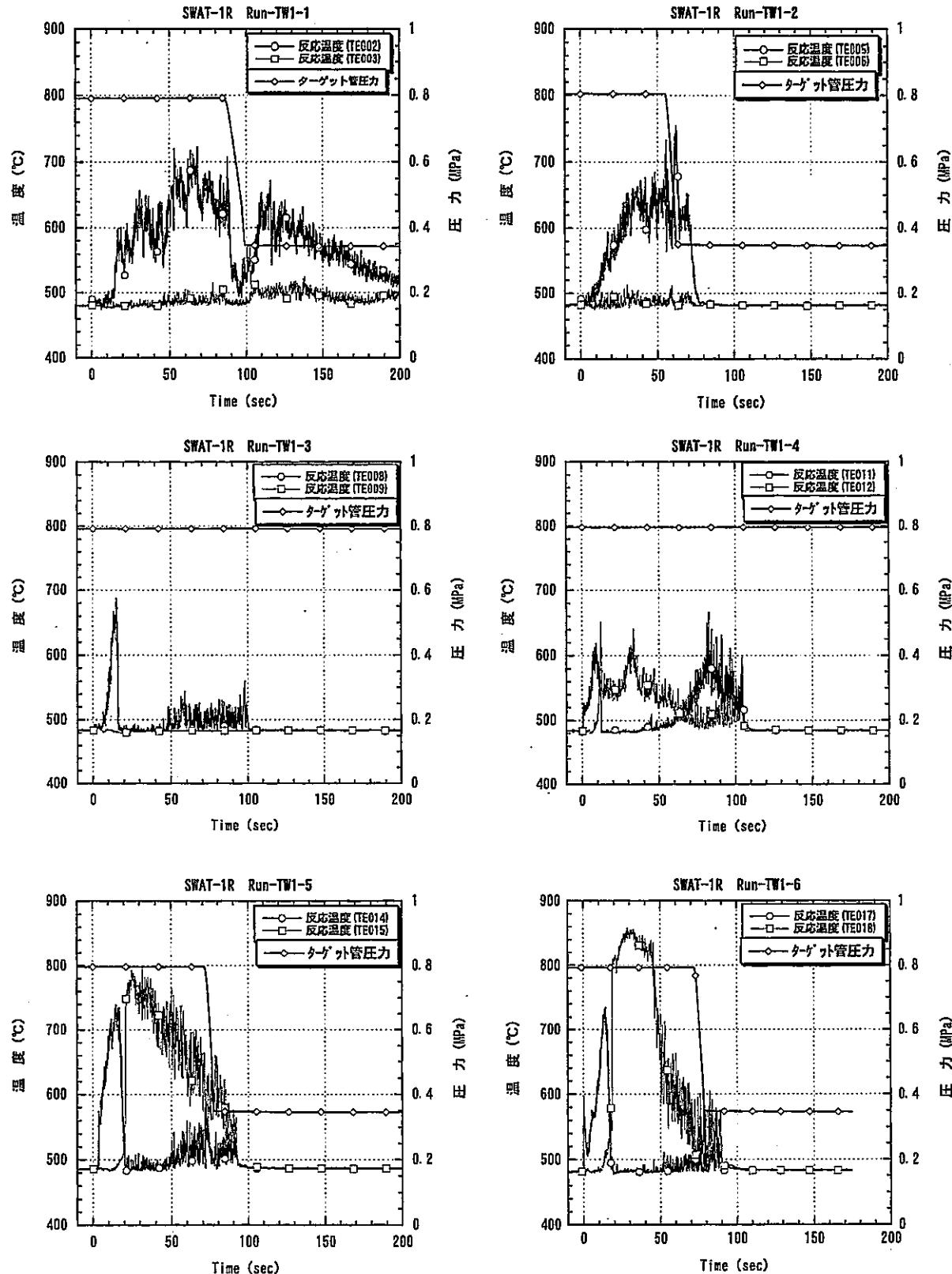


図5.1(1/2) 反応ジェット温度変化とターゲット管圧力変化（破損）時間 (Run-TW1-1~6)

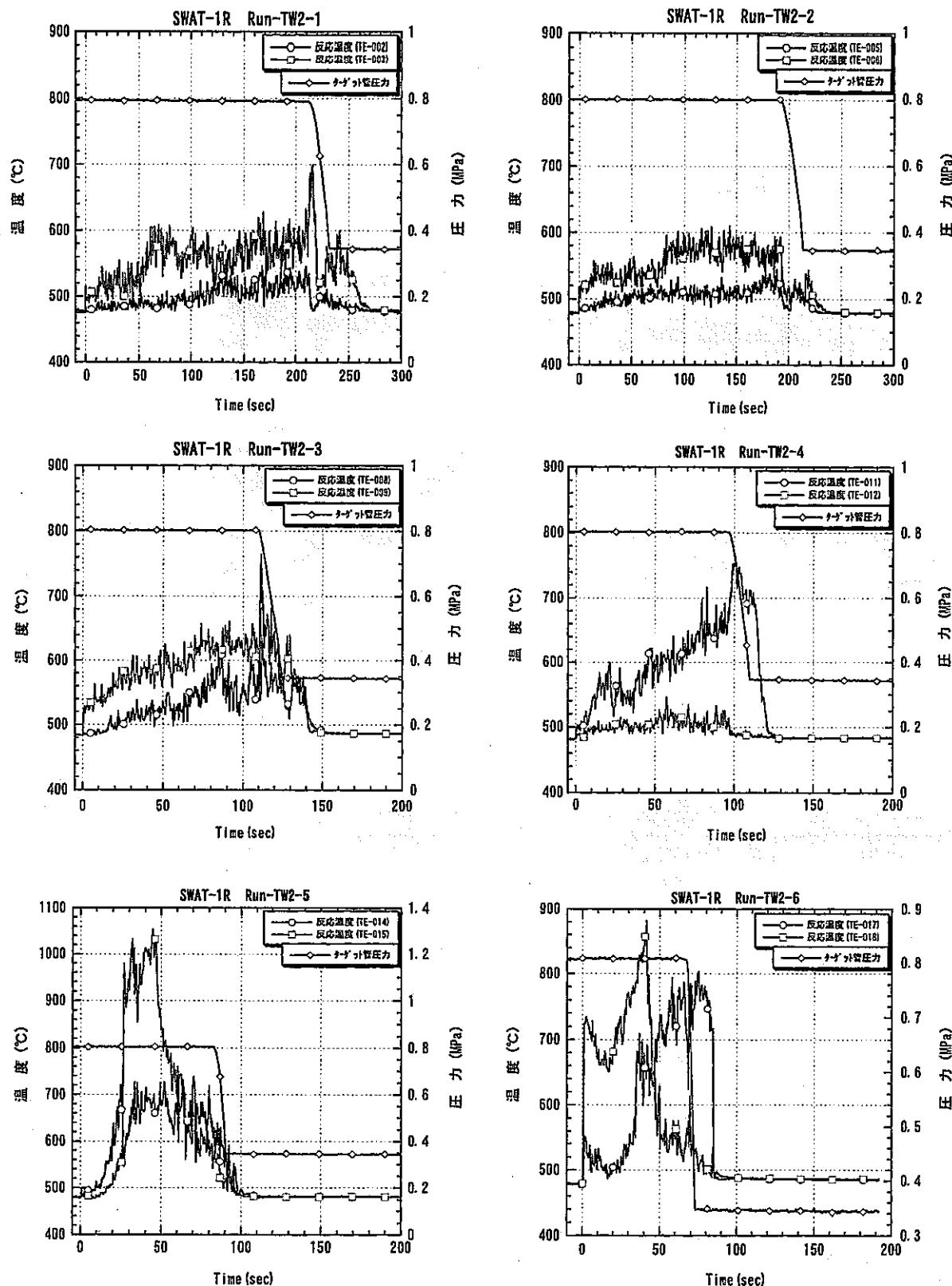


図5.1(2/2) 反応ジェット温度変化とターゲット管圧力変化（破損）時間 (Run-TW2-1~6)

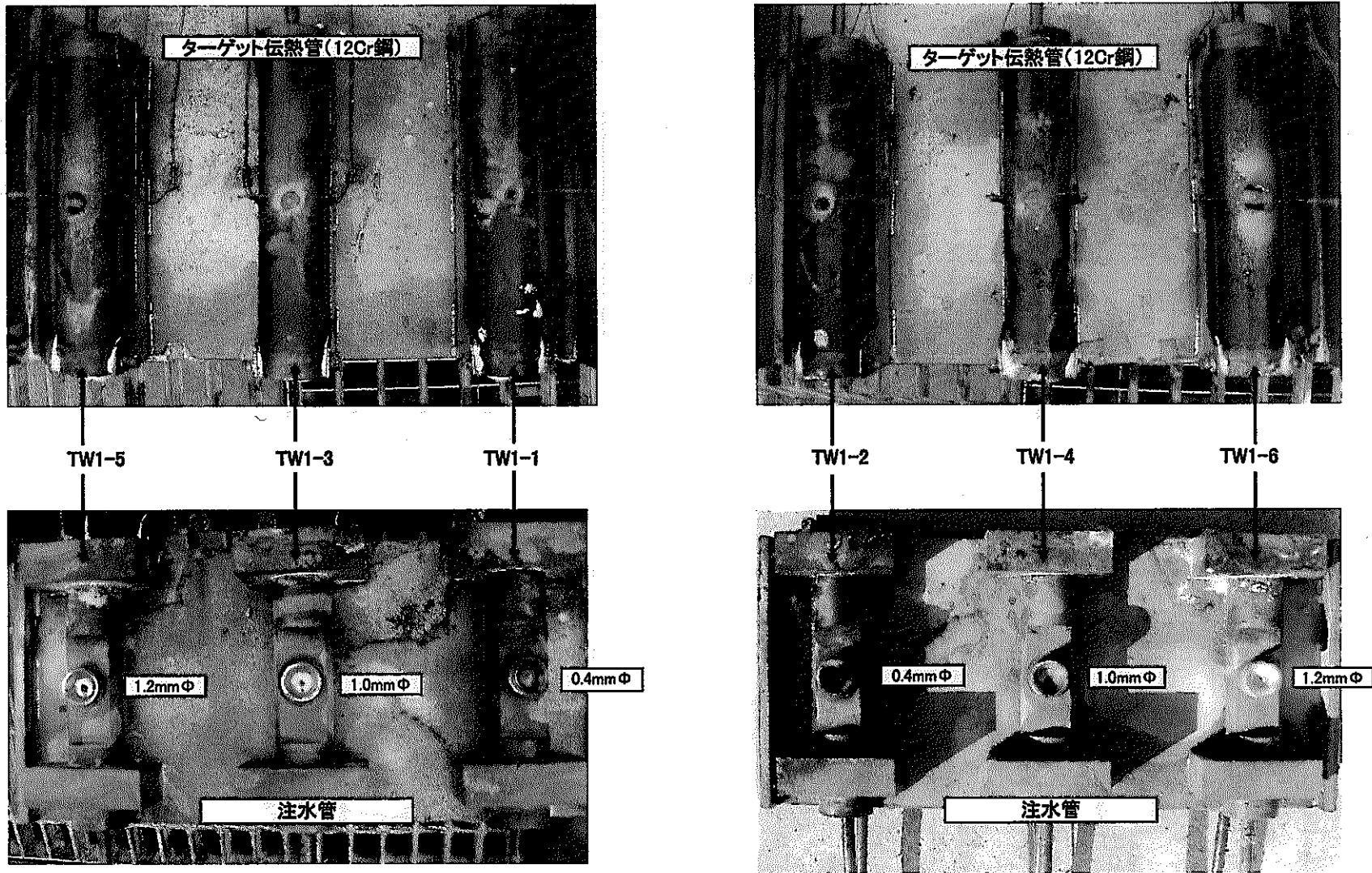


図5.2(1/2) 注水実験後の試験体ユニット(Run-TW1シリーズ)

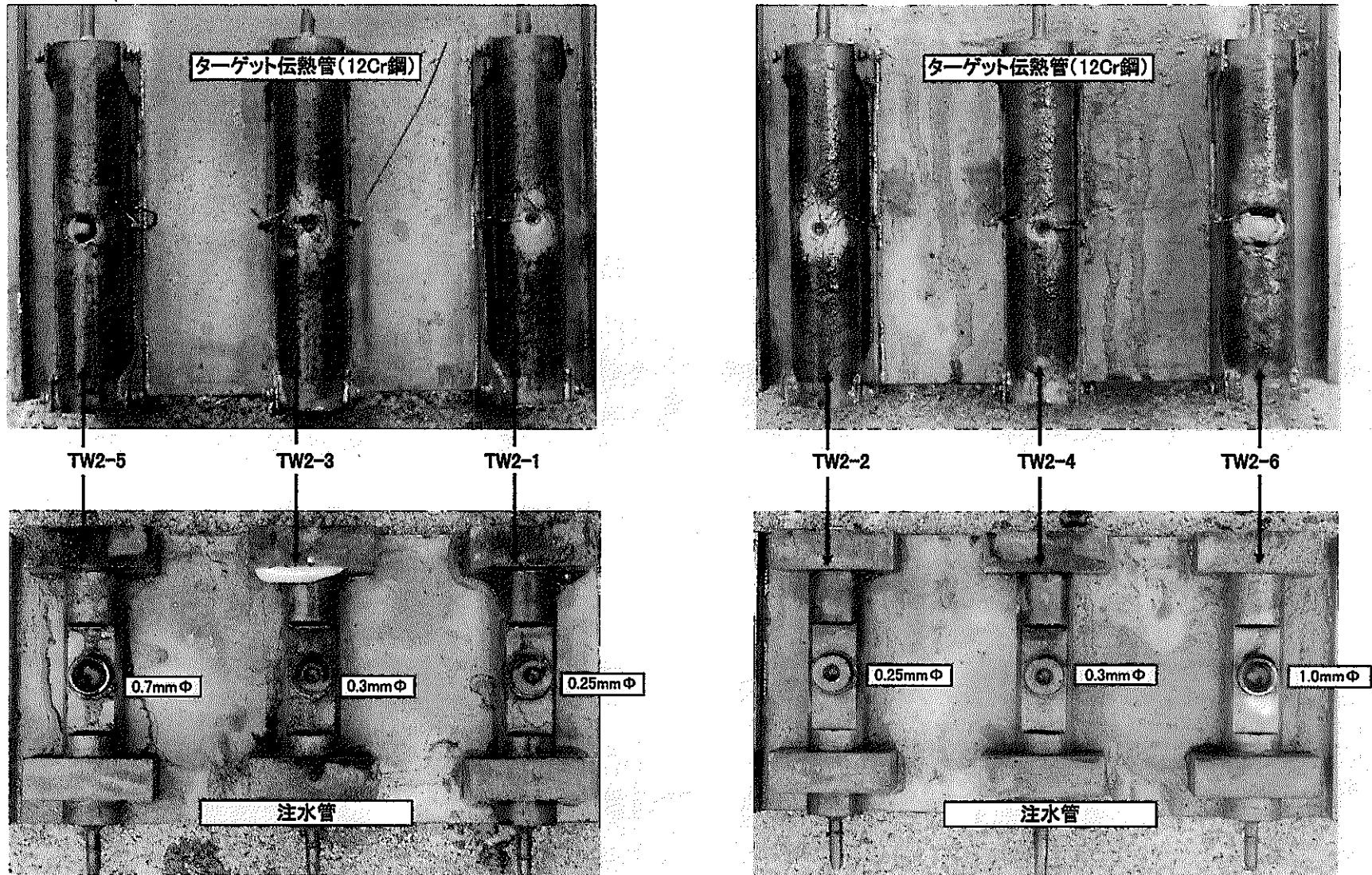
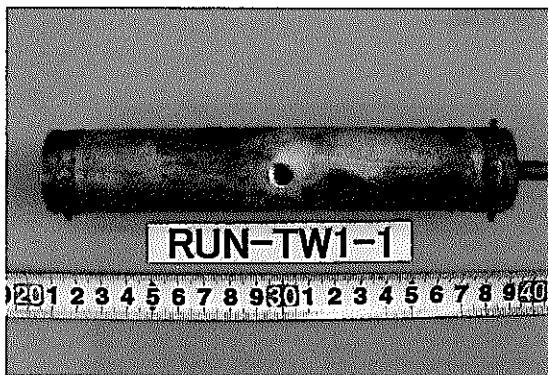
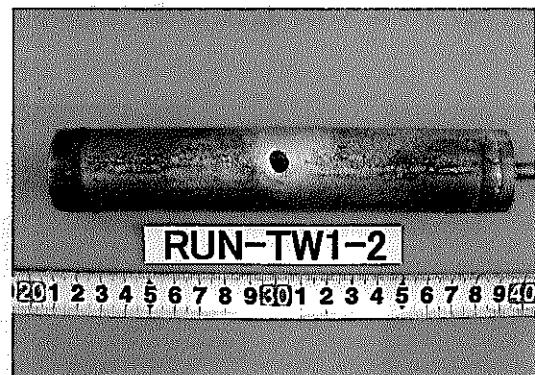


図5.2(2/2) 注水実験後の試験体ユニット(Run-TW2シリーズ)



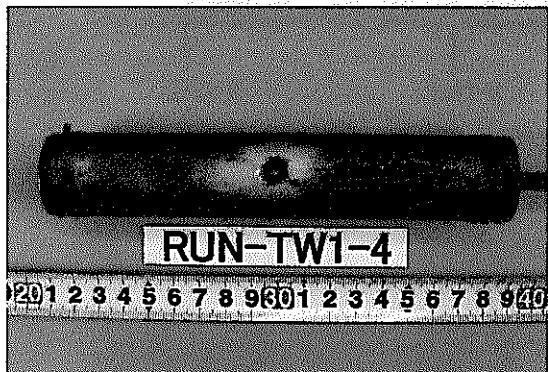
Run-TW1-1 (6.8g/sec)



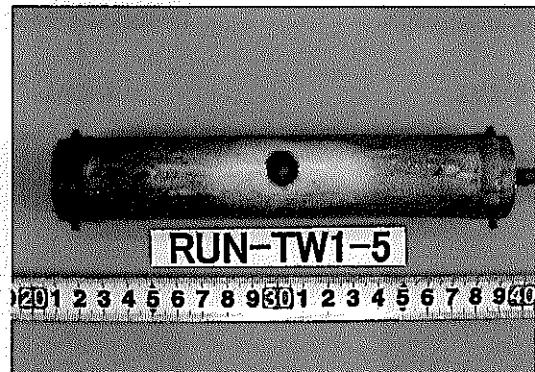
Run-TW1-2 (8.5g/sec)



Run-TW1-3 (5.4g/sec)



Run-TW1-4 (9.6g/sec)



Run-TW1-5 (9.5g/sec)

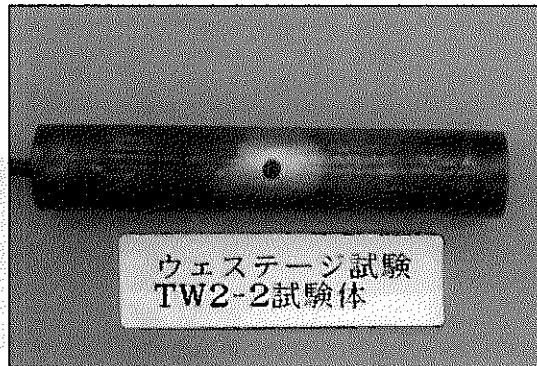


Run-TW1-6 (13.5g/sec)

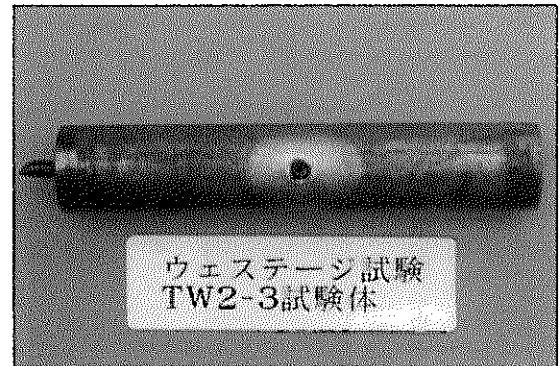
図5.3(1/2) 注水実験後の12Cr鋼ターゲット伝熱管(Run-TW1シリーズ)



Run-TW2-1 (1.9g/sec)



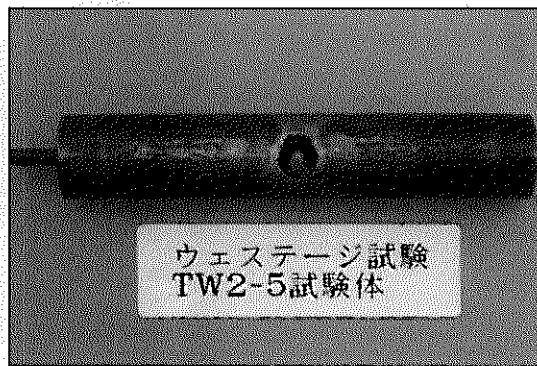
Run-TW2-2 (2.0g/sec)



Run-TW2-3 (3.8g/sec)



Run-TW2-4 (3.5g/sec)



Run-TW2-5 (16.1g/sec)



Run-TW2-6 (15.2g/sec)

図5.3(2/2) 注水実験後の12Cr鋼ターゲット伝熱管(Run-TW2シリーズ)

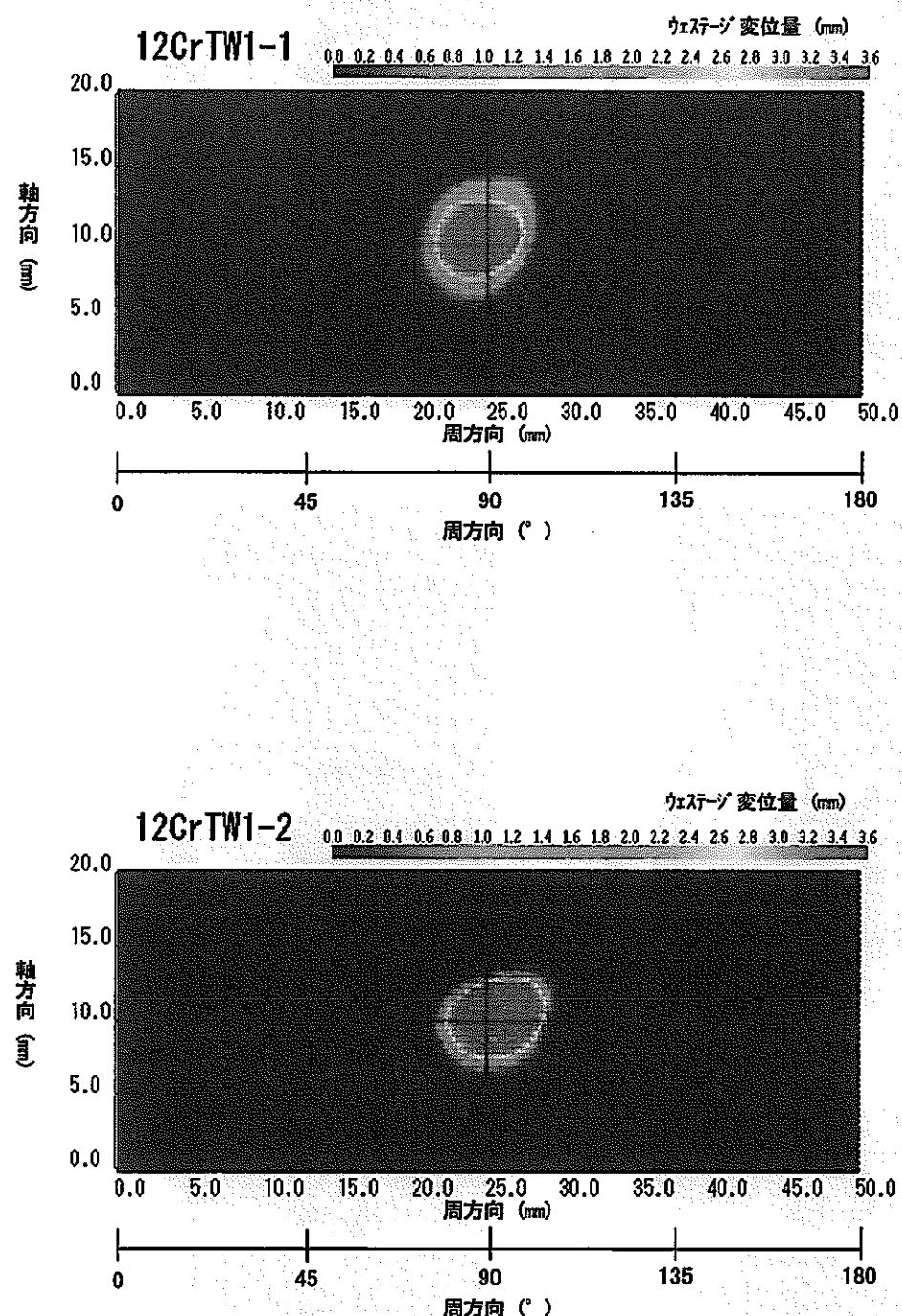


図 5.4(1/6) ターゲット管ウェステージ形状の等高線図 (Run-TW1-1, Run-TW1-2)

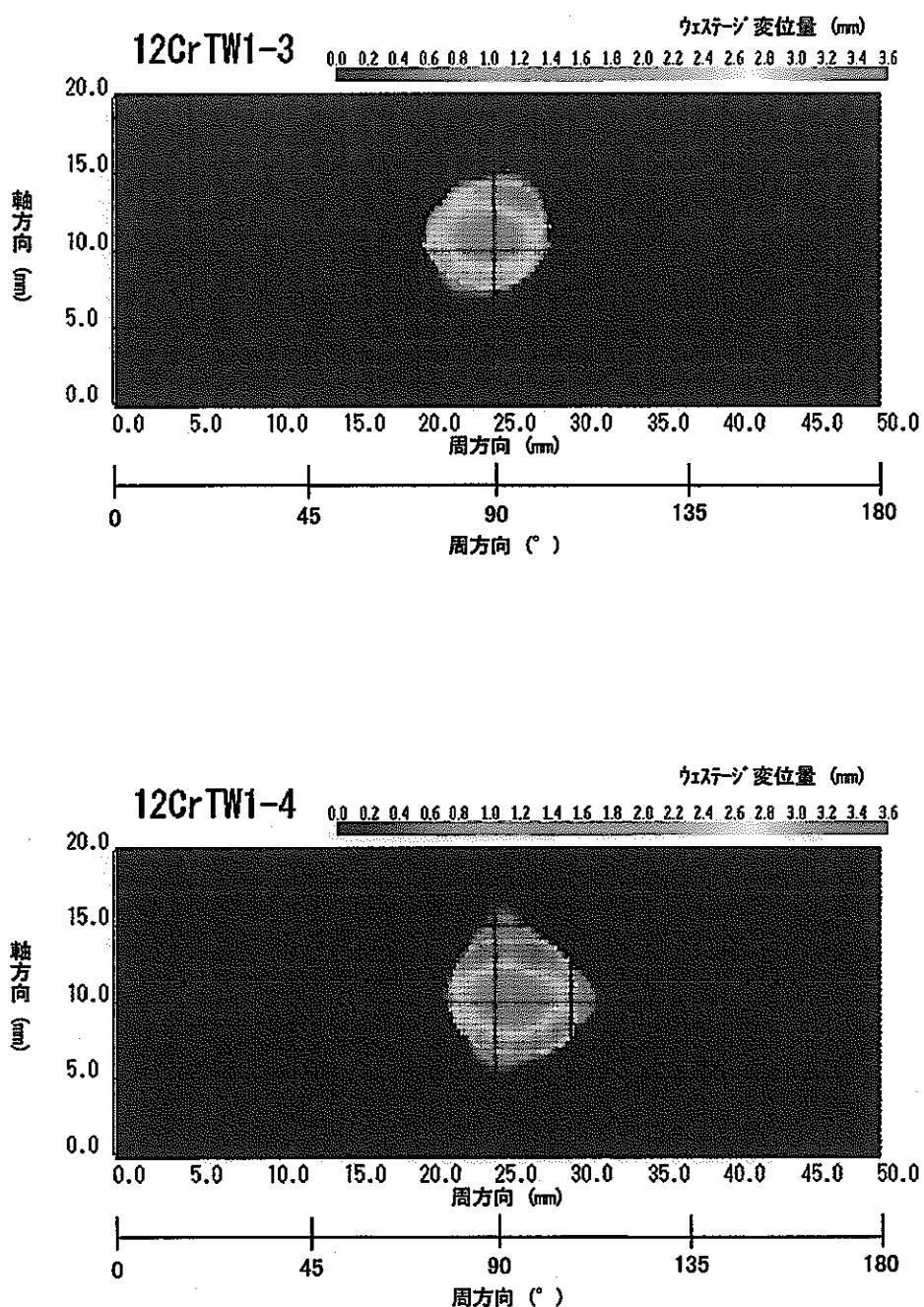


図 5.4(2/6) ターゲット管ウェステージ形状の等高線図 (Run-TW1-3, Run-TW1-4)

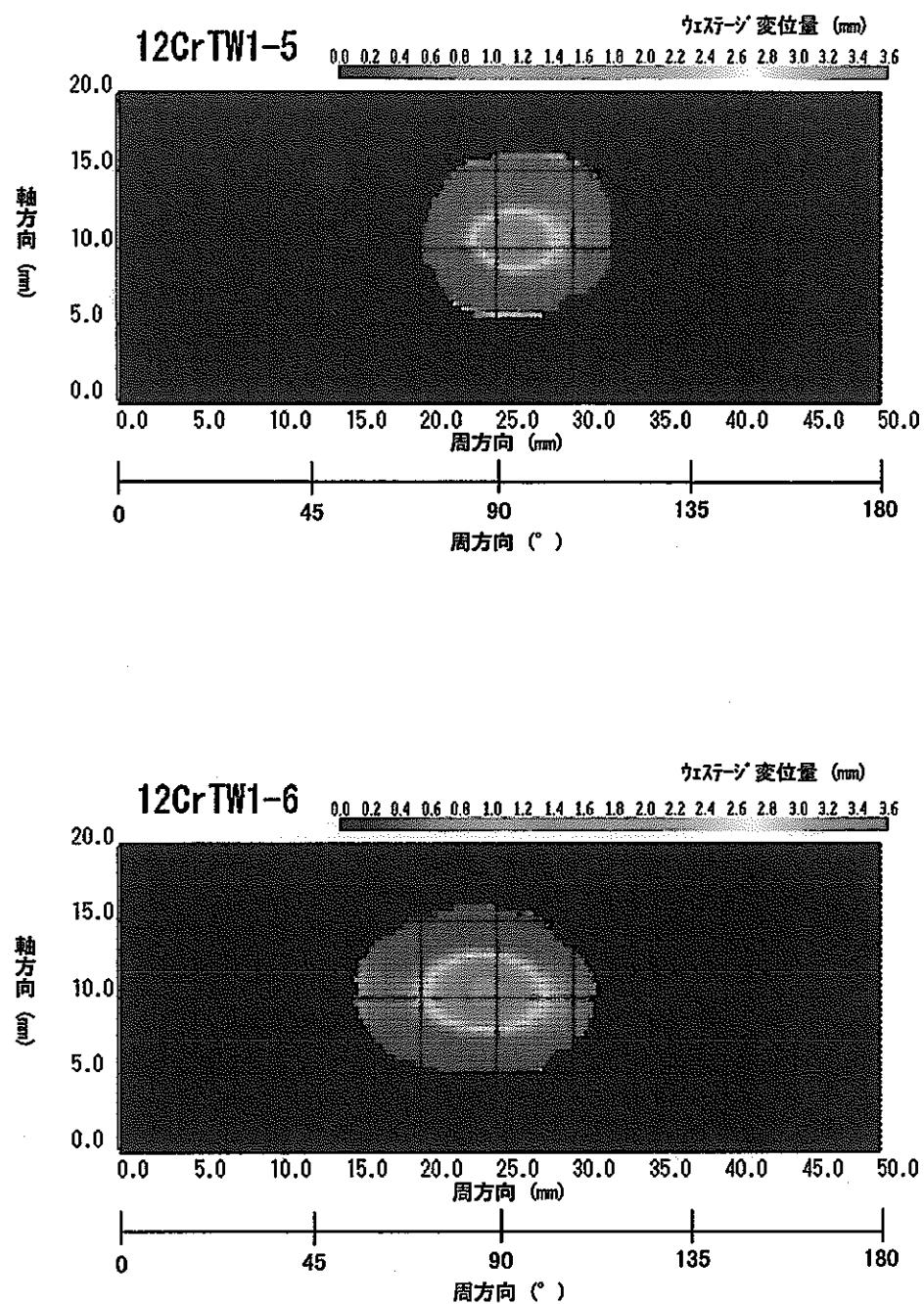


図 5.4(3/6) ターゲット管ウェステージ形状の等高線図 (Run-TW1-5, Run-TW1-6)

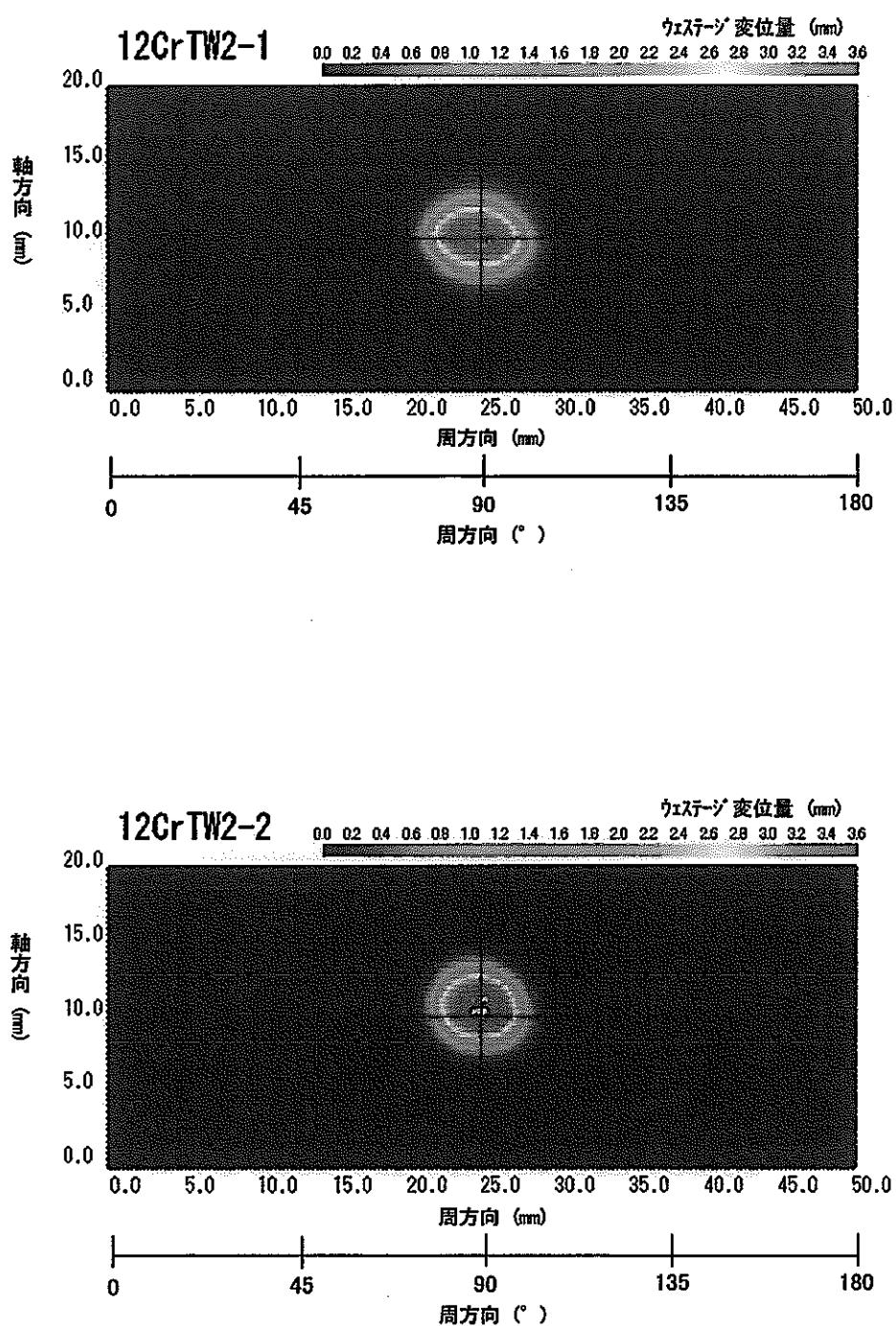


図 5.4(4/6) ターゲット管ウェステージ形状の等高線図 (Run-TW2-1, Run-TW2-2)

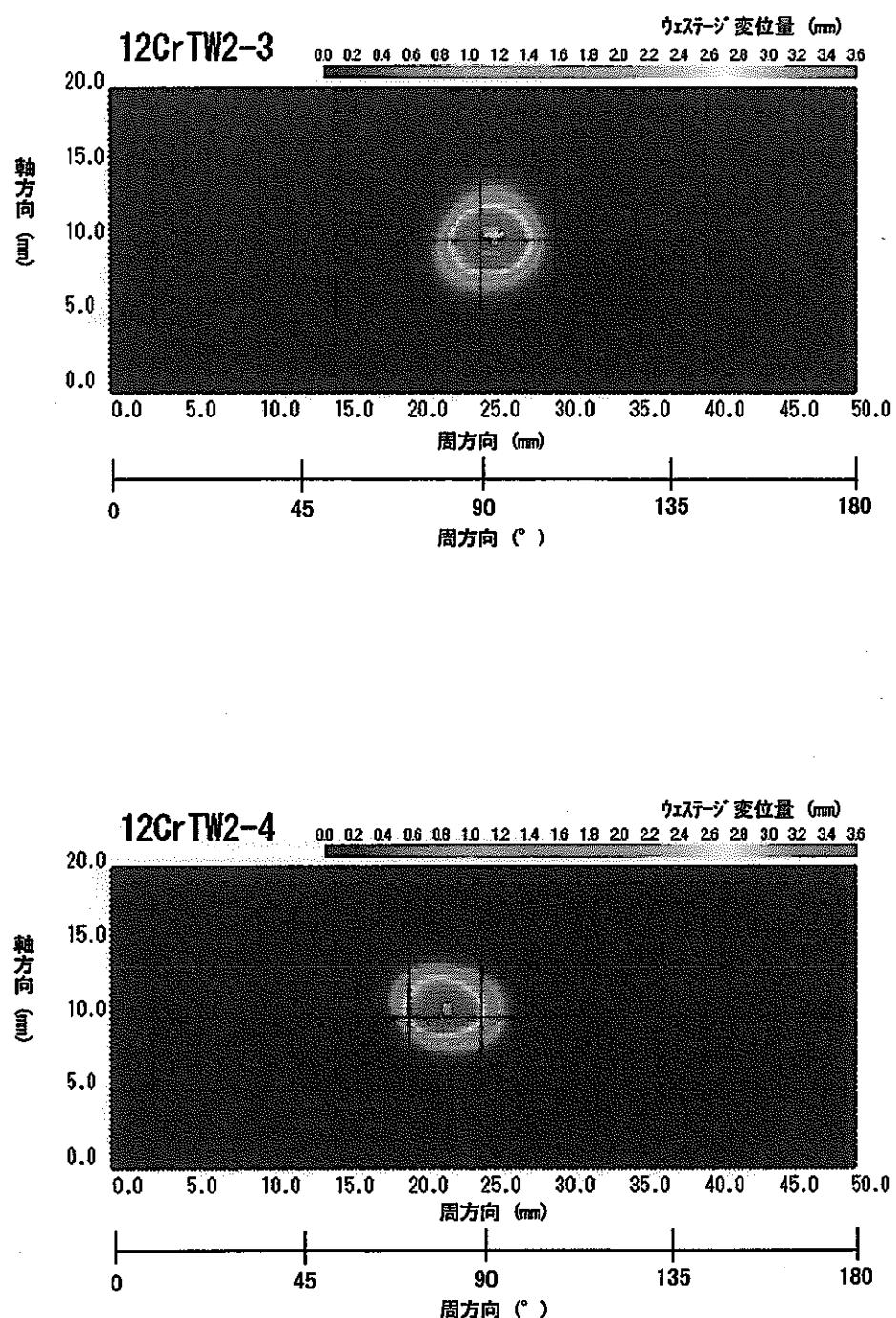


図 5.4(5/6) ターゲット管ウェステージ形状の等高線図 (Run-TW2-3, Run-TW2-4)

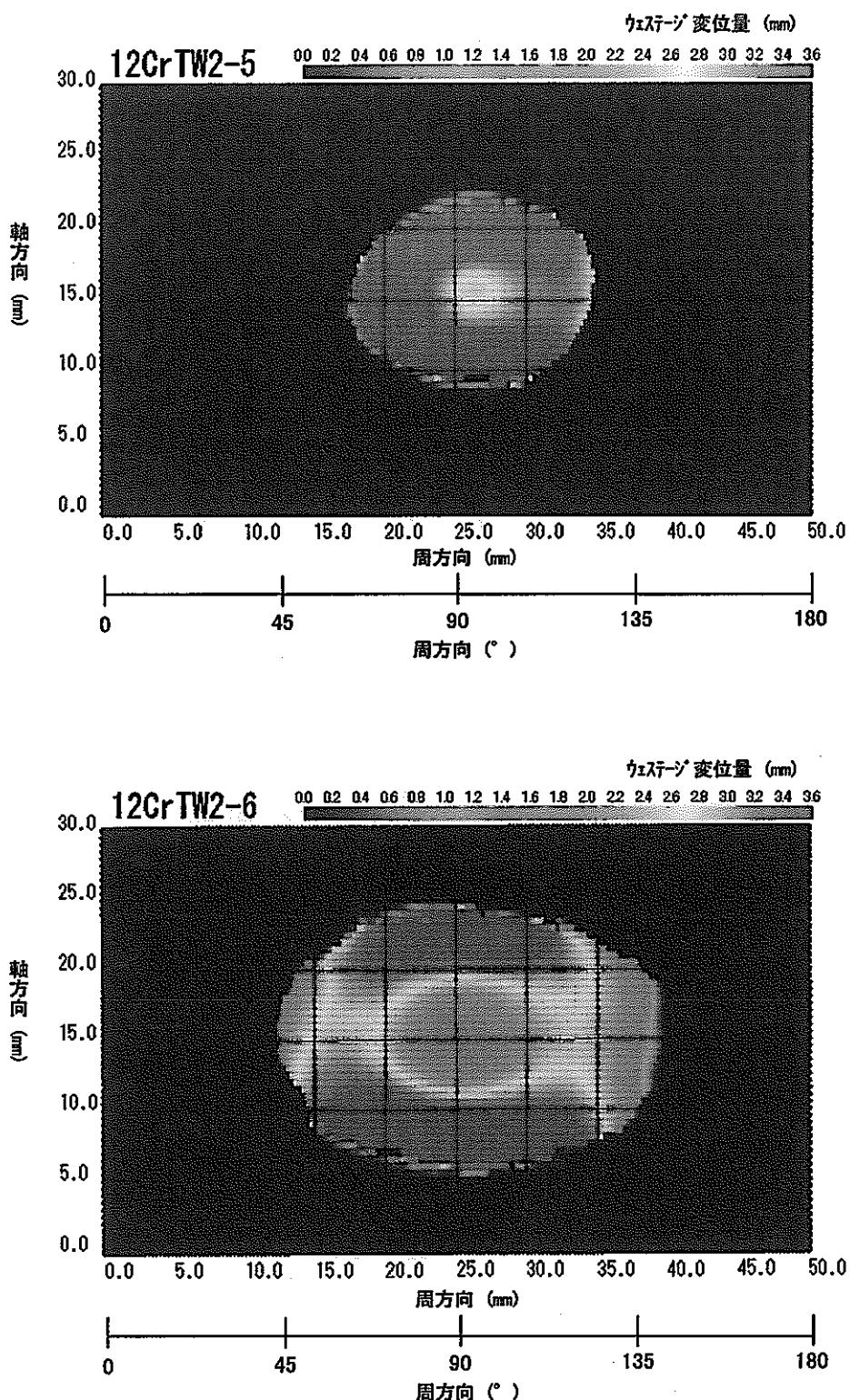


図 5.4(6/6) ターゲット管ウェステージ形状の等高線図 (Run-TW2-5, Run-TW2-6)

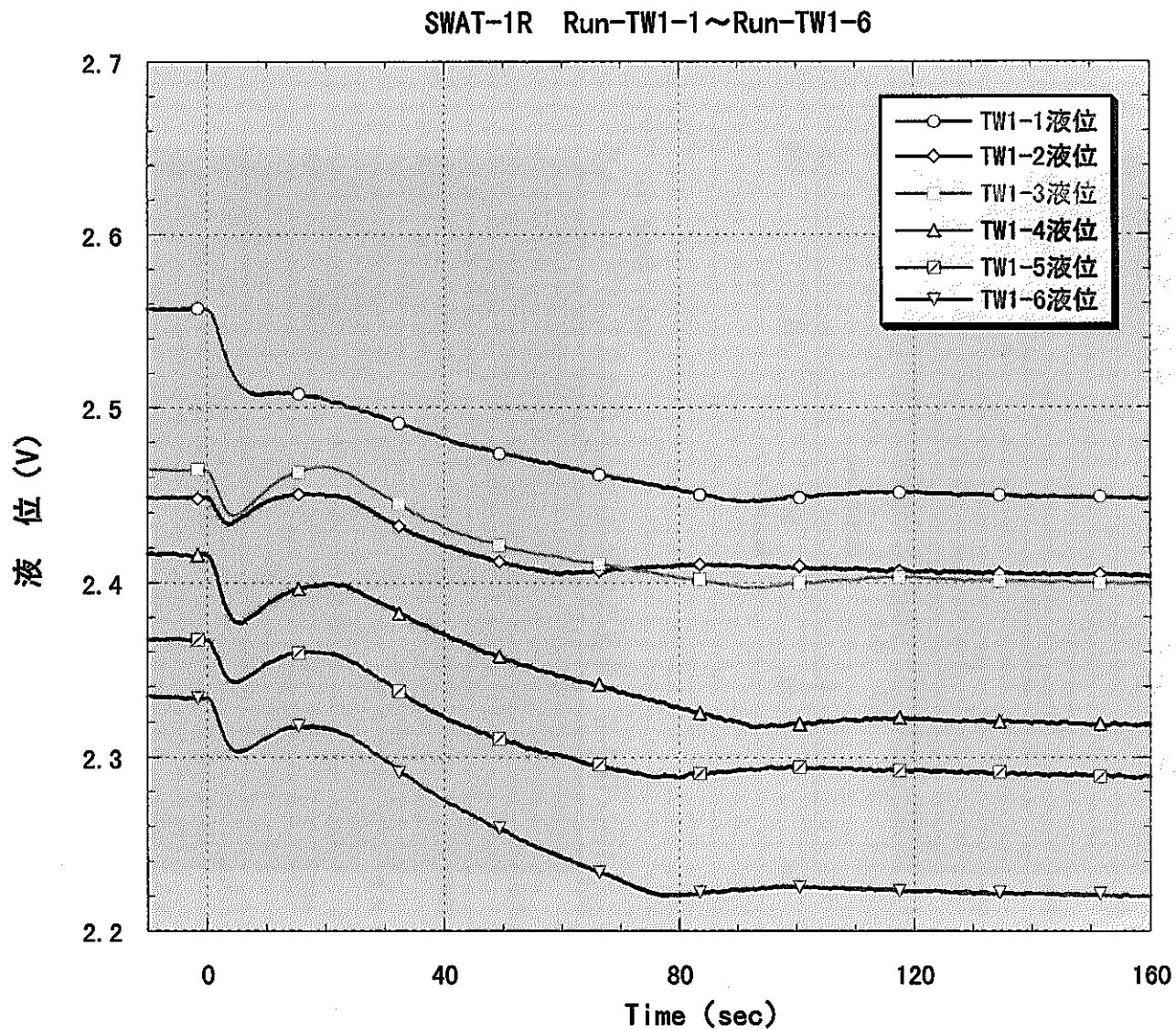


図5.5(1/2) 注水実験時の水加熱器液面変化 (Run-TW1シリーズ)

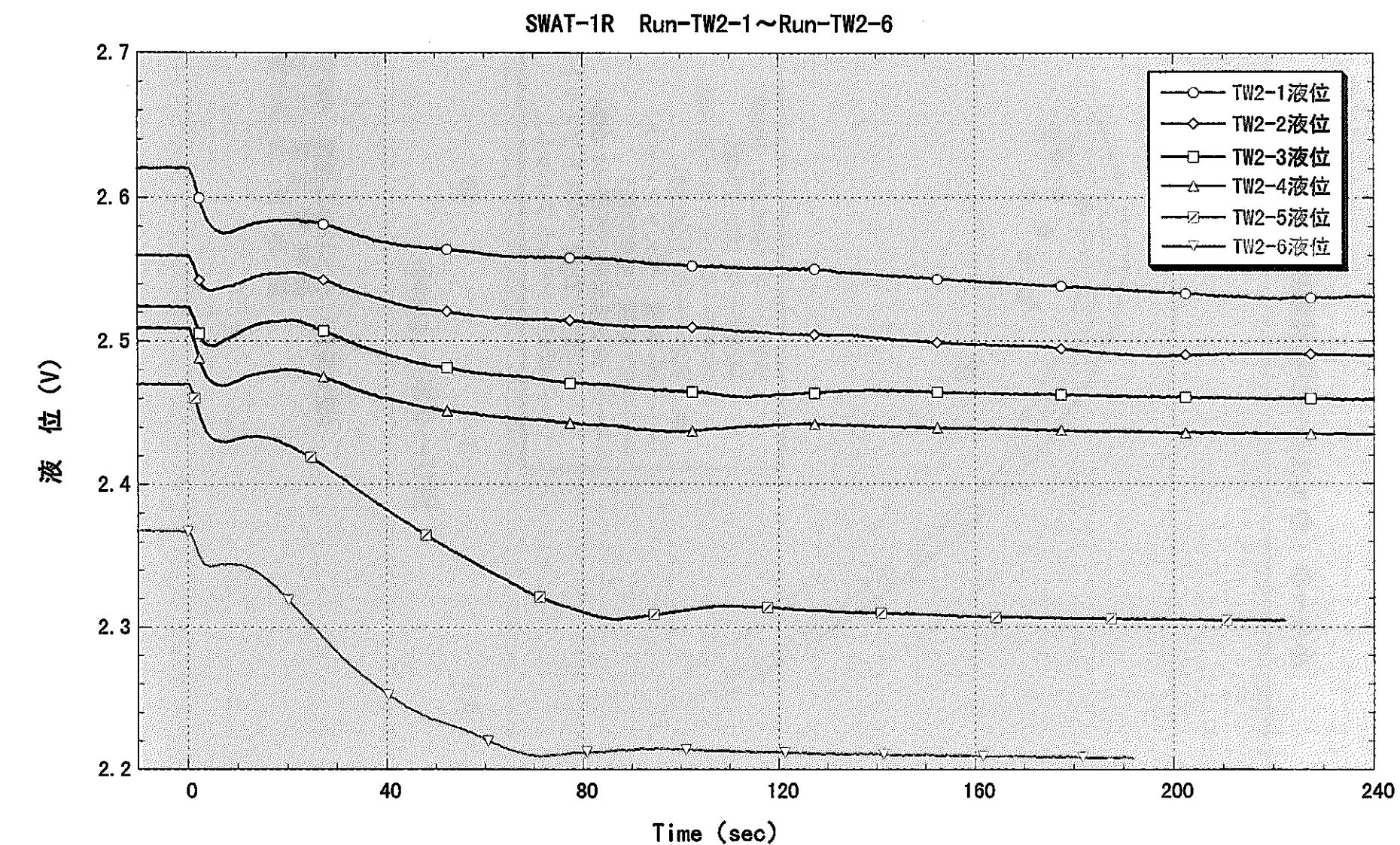
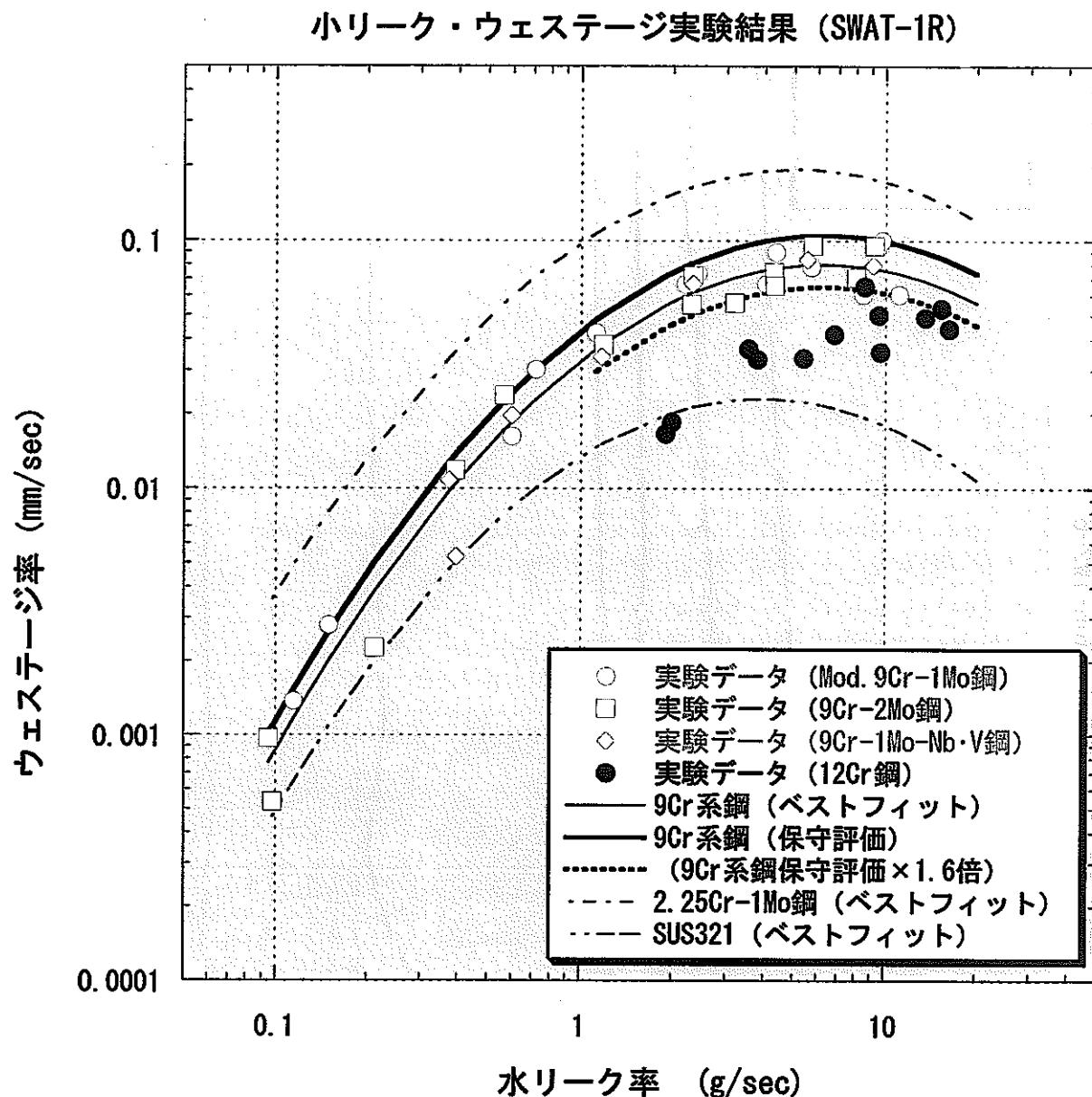


図5.5(2/2) 注水実験時の水加熱器液面変化 (Run-TW2シリーズ)



(固定条件) ナトリウム温度 : 480°C
伝熱管距離 : 16.2mm
注水圧力 : 約13MPa

図5.6 ウェステージ率と水リーク率による耐ウェステージ性評価