

ATR 原子炉格納容器内圧力解析コード -CONPOL-

技 術 資 料		
開示区分	レポ ー ト No.	受 領 日
T	N1410 97-028	97.8.29
<p>この資料は技術管理室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です 動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室</p>		

1997年8月

動力炉・核燃料開発事業団

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下さい。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technical Evaluation and Patent Office, Technology Management Division, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 9-13, 1-chome, Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107, Japan

© 動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1997

目 次

1. 概要	1
1.1 解析コード	1
1.2 解析モデル	1
2. 解析手法	2
2.1 概要	2
2.2 計算モデル	2
3. 実験解析	8
3.1 概要	8
3.2 ブローダウン解析(ECCS 性能評価解析との比較)	8
3.3 格納容器壁への蒸気凝縮熱伝達(CVTR 炉実規模試験 結果との比較)	8
4. まとめ	10
5. 参考文献	11

1. 概要

新型転換炉(ATR)の安全評価事象の内、「事故」の「原子炉格納容器内圧力、雰囲気等の異常な変化」に分類される事象における格納容器内の圧力、温度の評価には、原子炉格納容器内圧力解析コード CONPOL を用いている。

ここでは、解析コードの機能及び解析モデルを示す。

1.1 解析コード

本コードは、原子炉冷却材喪失事故が発生した場合における高温高圧の冷却材流入による格納容器内圧力上昇、温度上昇を評価する。そのため、本コードは下記の計算機能を有している。

- (1) 原子炉冷却設備からのブローダウン量
- (2) 原子炉冷却設備からの放熱
- (3) 格納容器壁への蒸気凝縮熱伝達
- (4) 格納容器スプレイ系によるスプレイ冷却効果

1.2 解析モデル

本解析コードのモデルを図 1-1 に示す。本コードでは、原子炉冷却設備、格納容器、蒸気放出プールをモデル化し、それぞれに対し質量保存の式、エネルギー保存の式を基礎に、圧力、温度及び質量変化を求めている。

2. 解析手法

2.1 概要

CONPOL は、原子炉冷却設備、格納容器、蒸気放出プールに対し質量保存の式、エネルギー保存の式を基礎に、圧力、温度及び質量変化を求めている。各々は次のようにモデル化している。

(1) 原子炉冷却系モデル

原子炉冷却設備は、ループ毎 1 ノードのベッセルとして扱う。内部に炉心での発熱を考慮できる他、蒸気ドラム等の構造材熱容量が考慮できる。また、給水や非常用炉心冷却系による注水及び破断口、主蒸気系、安全弁等による流出が考慮できる。ベッセル内は完全熱平衡状態にあると仮定している。

(2) 格納容器モデル

格納容器(気相部)は、1 ノードモデルであり、蒸気・空気の 2 相熱平衡状態を考える。原子炉冷却設備破断口からのブローダウン水は気相部が格納容器へ、液相部が蒸気放出プールへ配分される。また格納容器スプレイ系による冷却効果を考慮する。構造材に対しては、原子炉冷却設備からの放熱及び格納容器壁への田上の式による蒸気凝縮熱伝達を考慮する。外気への伝熱は断熱としている。

(3) 蒸気放出プールモデル

蒸気放出プールは、11 個のプールまで扱え、内部の流動、温度変化を計算できる。蒸気放出プールへは、破断口からのブローダウン水、安全弁からの蒸気放出、格納容器スプレイ系による凝縮水の流入がある。蒸気放出プールは、蒸気放出プール冷却系により冷却される。

2.2 計算モデル

(1) 基本式

CONPOL は、原子炉冷却設備、格納容器、蒸気放出プールに対し下記質量保存の式、エネルギー保存の式を基礎に、圧力、温度及び質量変化を求めている。

[質量バランス]

$$\frac{dW}{dt} = \sum G_{in} - \sum G_{out}$$

ここで

$$\frac{dW}{dt} \quad : \text{重量の時間変化(kg/s)}$$

$$\sum G_{in} \quad : \text{系内への流入質量(kg/s)}$$

$$\sum G_{out} \quad : \text{系外への流出質量(kg/s)}$$

[エネルギーバランス]

$$\frac{dE}{dt} = \sum G_{in} e_{in} - \sum G_{out} e_{out} + Q_{IN} - Q_{WL}$$

$$Q_{WL} = \sum A_i H_i (T_c - T_w)$$

ここで、

$$\frac{dE}{dt} \quad : \text{系内保有エネルギーの時間変化(kcal/s)}$$

$$e_{in} \quad : \text{系内への流入流体内部比エンタルピ(kcal/kg)}$$

$$e_{out} \quad : \text{系外への流出流体内部比エンタルピ(kcal/kg)}$$

$$Q_{IN} \quad : \text{系内での発生熱量(kcal/s)}$$

$$Q_{WL} \quad : \text{構造材への伝熱量(kcal/s)}$$

$$A_i \quad : \text{表面積 (m}^2\text{)}$$

$$H_i \quad : \text{熱伝達率(kcal/m}^2\text{s}^\circ\text{C)}$$

$$T_c \quad : \text{格納容器内温度(}^\circ\text{C)}$$

$$T_w \quad : \text{壁面温度(}^\circ\text{C)}$$

(2) 格納容器内圧力・温度計算

上述の基本式より、各タイムステップでの質量、エネルギーの状態を求め、次式により熱平衡状態での圧力と温度を評価する。

$$P = P_s + P_a \quad (P \text{ は格納容器内全圧})$$

① 蒸気分圧(P_s)の計算

$$x_u = \frac{u - u_l - u_a}{u_g - u_l}$$

$$x_v = \frac{v - v_l}{v_g - v_l}$$

$$x_u(T, P_s) = x_v(T, P_s) = x$$

となる T 、 P_s を見出す。ここで、 x_u 、 x_v は、それぞれ内部エネルギー及び比容積から計算したクオリティである。

② 空気の分圧(P_a)の計算

$$P_a = \frac{W_a}{V_0} R(T+273)$$

ここで

$$u = \frac{E_0}{W_s + W_w}$$

$$v = \frac{V_0}{W_s + W_w}$$

$$u_g = h_g - v_g \cdot P_s / 426.8$$

$$u_l = h_l$$

$$u_a = C_v \cdot T \cdot v / v_a$$

$$v_a = V_0 / W_a$$

E_0 : 全内部エネルギー(kcal)

V_0 : 全体積(m^3)

u : 比内部エネルギー(kcal/kg)

v : 比容積(m^3/kg)

h : エンタルピ(kcal/kg)

W : 質量(kg)

C_v : 定積比熱(kcal/kg $^{\circ}C$)

R : 空気のガス定数(kcal/molK)

x : クオリティ(-)

T : 温度($^{\circ}C$)

P : 圧力(kg/ m^2)

添字 s : 蒸気 w : 水 a : 空気 g : 飽和蒸気 l : 飽和水

(3) 壁面温度計算

構造材壁の熱容量計算は、平板1次元のモデルで構造材壁を厚さ方向にノード分割して計算する。

① 構造材壁熱伝導

$$\nabla K \nabla T = \rho C \frac{dT}{dt}$$

② 構造材壁内側境界

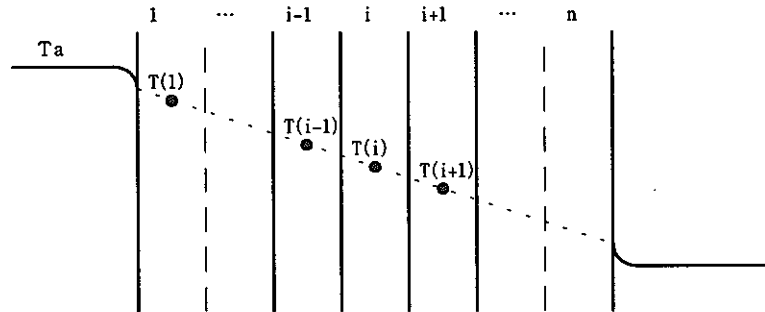
$$-K \left. \frac{dT(r)}{dr} \right|_{r=1} = H \{ T_a - T(1) \}$$

③ 構造材熱容量計算

$$\rho_i C_i \frac{dT(i)}{dt} = \frac{\frac{K_{i-1}}{2} \cdot \frac{r_i}{2}}{\frac{K_{i-1}}{2} + \frac{K_i}{2}} \cdot \frac{\frac{r_{i-1}}{2} + \frac{r_i}{2}}{\frac{r_{i-1}}{2} + \frac{r_i}{2}} \cdot \{ T(i-1) - T(i) \} - \frac{\frac{K_i}{2} \cdot \frac{K_{i+1}}{2}}{\frac{K_i}{2} + \frac{K_{i+1}}{2}} \cdot \frac{\frac{r_i}{2} + \frac{r_{i+1}}{2}}{\frac{r_i}{2} + \frac{r_{i+1}}{2}} \cdot \{ T(i) - T(i+1) \}$$

ここで、

K : 構造材熱伝導率(kcal/ms^{°C}) T : 温度(°C)
 ρ : 構造材比重量(kg/m³) C : 構造材比熱(kcal/kg^{°C})
 t : 時間(s) r : 板厚方向距離(m)
 H : 熱伝達率(kcal/m²s^{°C}) 次節「(4)格納容器内凝縮熱伝達」参照
 添字 a : 格納容器空気-蒸気相 i : 板厚ノード



(4) 格納容器内凝縮熱伝達

上述の基本式、格納容器内圧力・温度、壁面温度計算には、格納容器内凝縮熱伝達として、田上の式¹⁾を用いる。

$$H_{\max} = 99.3 \left(\frac{Q_P}{V \cdot t_P} \right)^{0.62} \quad (\text{kcal/m}^2\text{hr}^{\circ}\text{C})$$

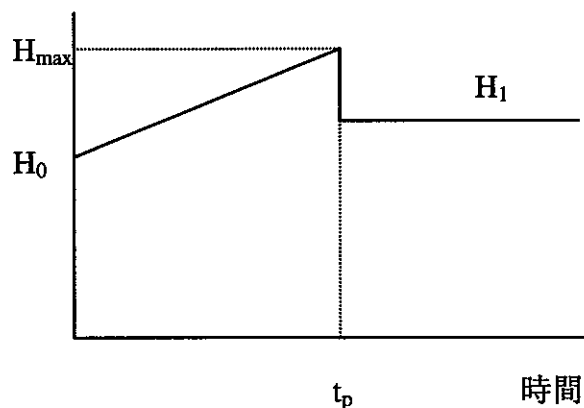
(コンクリートの場合には、0.4 倍する)

t_P : 格納容器最高圧力に達する時間(s)

Q_P : t_P までに格納容器内に放出される全エネルギー(kcal)

V : 格納容器体積(m³)

H_0 、 H_1 : 内田の式による熱伝達率



内田の凝縮熱伝達率

空気(kg)/水蒸気(kg)	熱伝達率 kcal/m ² h°C
0.0	1367.4 (×0.4)
0.1	1367.4 (×0.4)
0.5	683.7 (×0.4)
0.8	478.6 (×0.4)
1.3	307.6 (×0.4)
1.8	224.6 (×0.4)
2.3	180.8 (×0.4)
3.0	141.6 (×0.4)
4.0	117.2 (×0.4)
5.0	102.5 (×0.4)
7.0	83.1 (×0.4)
10.0	68.4 (×0.4)
14.0	48.8 (×0.4)
18.0	43.9 (×0.4)
20.0	39.1 (×0.4)
50.0	9.8 (×0.4)
1000000.0	9.8 (×0.4)

注) (×0.4)を考慮した値：コンクリート (×0.4)を考慮しない値：鋼板

(5) スプレイ凝縮

スプレイ系作動時には、上述の式に加え、下式によりスプレイ系の効果を考慮して評価する。

$$\frac{dW}{dt} = G\eta$$

$$\frac{dE}{dt} = G\eta h$$

ここで、

W：スプレイにより格納容器内に流入する質量(kg)

t：時間(s)

G：スプレイ流量(kg/s)

η：スプレイ効率(-)

E：スプレイにより格納容器内に流入するエネルギー(kcal)

h : エンタルピ(kcal/kg)

- (6) ブローダウン
小笠原の臨界流モデル²⁾を用いて計算する。

3. 実験解析

3.1 概要

原子炉冷却材喪失事故時の格納容器内圧力、温度評価では、「ブローダウン解析」、「格納容器壁への蒸気凝縮熱伝達」の2項目が大きな影響を与える。

ここでは、「ブローダウン解析」に関して、ECCS 性能評価解析との比較を実施し、また「格納容器壁への蒸気凝縮熱伝達」に関して、米国 AEC(Atomic Energy Commission)が CVTR(Carolina Virginia Tube Reactor)炉を用いて行った実規模実験の実験結果³⁾との比較を実施する。

3.2 ブローダウン解析(ECCS 性能評価解析との比較)

図 3-1 に格納容器内圧力応答解析に使用している破断流出流量と、ECCS 性能評価解析に使用している破断流出流量の比較を示す。図 3-1 に示すように、ECCS 性能評価解析使用値と比べて、格納容器内圧力応答解析使用値は破断流出流量が多い。このため、格納容器内へのエネルギー放出が多くなり、格納容器内圧力の上昇に対して厳しくなるよう保守側の値となっている。これは以下の理由によるものである。

- ① ECCS 性能評価解析では、多ノードで炉内の詳細な流動挙動を評価する。一方、格納容器内圧力応答解析では、1 ノードで評価し、流出流量を多めに評価するモデルとしている。
- ② ECCS 性能評価解析では、炉心冷却性評価のため原子炉冷却系初期保有水量を少な目に設定する。一方、格納容器内圧力解析では格納容器内圧力を厳しく評価するため、キャリアンダ率を 0.0 とし、原子炉冷却系初期保有水量を多めに設定している。

3.3 格納容器壁への蒸気凝縮熱伝達(CVTR 炉実規模試験結果との比較)

格納容器壁への蒸気凝縮熱伝達モデルを検証するために、CVTR 炉実規模試験の圧力変化についての実験結果との比較を実施した。図 3-2 に比較結果を示す。計算において凝縮熱伝達率は、CVTR 炉の実験で得られた値及び田上の式による値を用いた。実験による凝縮熱伝達率を用いた場合、解析値と実験値はよく一致している。また、安全解析に使用している田上の式を用いた場合には、圧力は実験値に比べて解析値が高く、保守側の結果となっている。

実機解析においては、コンクリート壁への放熱を考慮している。コンクリートは熱伝導率が小さく厚いため、壁のメッシュ切りによって放熱量が変わり格納容器内圧評価に影響がある可能性が考えられるが、コンクリート壁メッシュ分割を細かくした感度解析及びコンクリート壁への放熱を断熱とした場合の解析の結果、メッシュ分割数の格納容器内圧に対する感度が小さく、また、コンクリート壁へ

の放熱の影響が小さいことを確認している。

また、実機の格納容器はコンパートメント化されているが、格納容器内の圧力計算は1点で計算している。これについては、格納容器内を多ノードに分割したモデルでの解析を行い、ブローダウン開始直後では各ノード間に圧力差が生じるものの、最高圧力となるブローダウン終了後は各ノードが均圧化するため、格納容器内モデルを1ノードとしても最高圧力に対する影響がないことを確認している。

4. まとめ

CONPOL は、安全評価事象の内、「事故」の「原子炉格納容器内圧力、雰囲気等の異常な変化」に分類される事象における格納容器内の圧力、温度の評価に用いられている。

CONPOL のブローダウンモデル、格納容器壁への蒸気凝縮熱伝達モデルの妥当性評価を ECCS 性能評価解析との比較及び米国 AEC が CVTR 炉を用いて行った実規模実験の実験結果との比較に基づきそれぞれ実施した。

その結果、「事故」の「原子炉格納容器内圧力、雰囲気等の異常な変化」に分類される事象における格納容器内の圧力、温度への CONPOL の適用性が確認できた。

5. 参考文献

- (1) T.Tagami : "Safety Assessments and Facilities Establishment Project" (LOFT、TAN、NRTS) 1966.2
- (2) 小笠原英雄 : "二相流臨界流の理論" 日本機会学会論文集 31 卷 255 号(1965)
- (3) 浜松照秀、岩田宇一 : "原子炉格納容器スプレイの圧力低減効果(その1)" 電力中央研究所報告 277002 1977.8

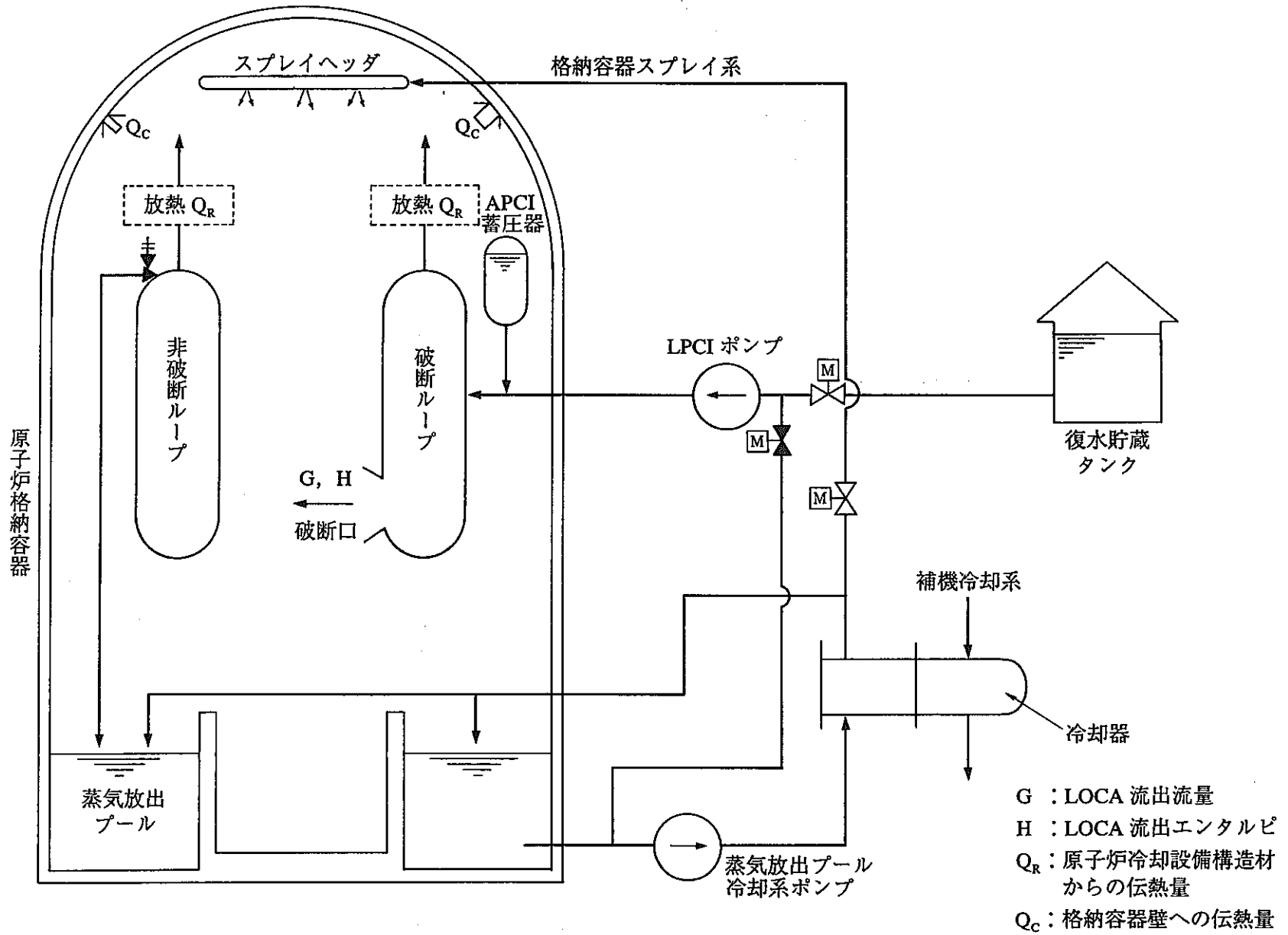


図 1-1 格納容器解析モデル

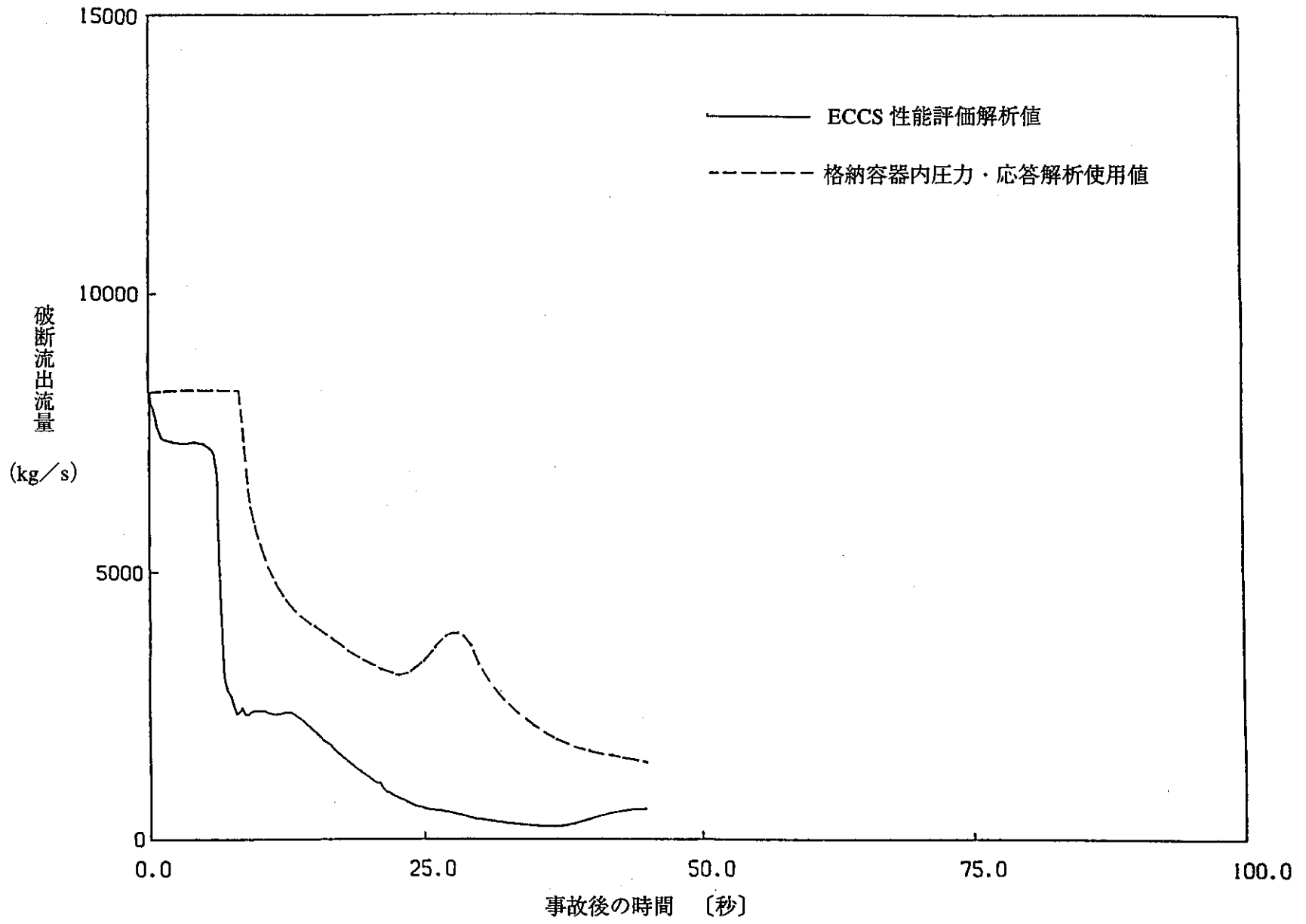


図3-1 破断流出流量変化の比較

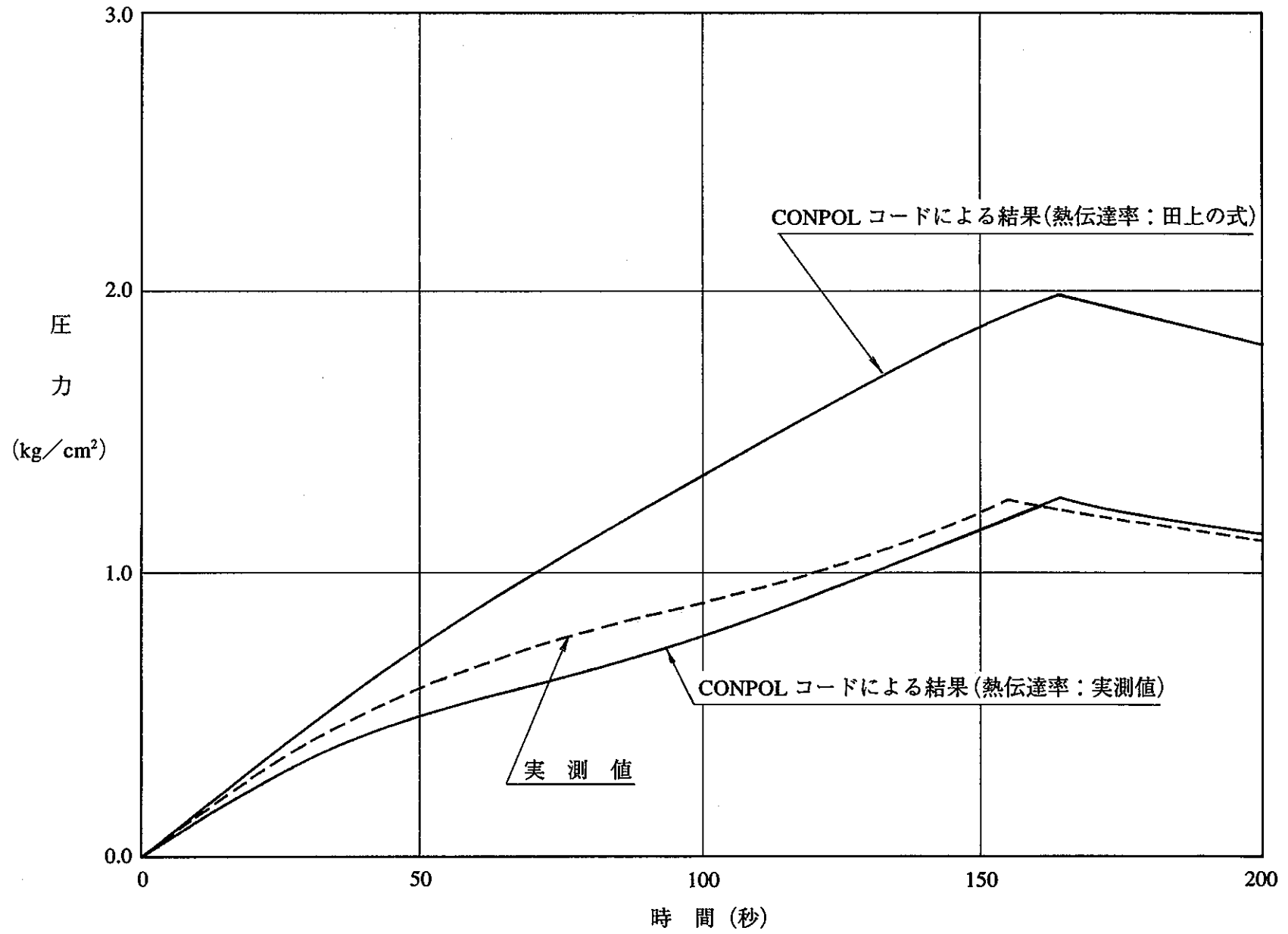


図 3-2 CVTR DBA 試験条件下の圧力変化