

# 高速炉の冷却系に関する総合試験計画

・炉容器および1次冷却系モデルの検討

1996年8月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

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。

〒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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, O-arai-machi, Higashiharaki, Ibaraki-Ken 311-13, Japan.

動力炉・核燃料開発事業団（Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation）1996

## 高速炉の冷却系に関する総合試験計画 —炉容器および1次冷却系モデルの検討—

上出英樹<sup>1</sup>、林 謙二<sup>1</sup>、軍司 稔<sup>1</sup>、林田 均<sup>1</sup>、西村元彦<sup>1</sup>、  
飯塚 透<sup>1</sup>、木村暢之<sup>1</sup>、田中正暁<sup>1</sup>、仲井 悟<sup>1</sup>、望月弘保<sup>1</sup>、  
柳原安英<sup>2</sup>

### 要旨

動力炉・核燃料開発事業団では「原子炉冷却系総合試験」として、高速炉の実用化を目指し、実証炉段階で採用される原子炉冷却系に係る新概念技術の確立を目的とし、原子炉容器から蒸気発生器までの1次、2次冷却系、水蒸気系、崩壊熱除去系を総合的に模擬した大型ナトリウム試験を計画している。

実証炉の特徴であるトップエントリー配管システム、炉内冷却器を用い自然循環を積極的に活用した崩壊熱除去系、低温流体循環方式の炉容器壁保護系、一体貫流型蒸気発生器、再循環系を用いた崩壊熱除去運転などを含め配管短縮化、機器のコンパクト化、高信頼性崩壊熱除去システムなどについて熱流動上の課題、構造上の課題を設定し、それらを解決できる試験装置として特に原子炉容器ならびに1次冷却系の試験モデルの検討を行った。特に1) 実証炉の熱流動と構造上の課題に対する解決方策としての充足、2) 熱流動上の課題と構造上の課題のバランス、3) 総合試験として系統全体での複合現象、構成機器間の熱流動的および構造的相互作用の模擬を重視して、試験モデル候補概念の創出、予測解析を含む定量的な比較評価、モデルの選定を行なった。さらに選定モデル概念を元に、「原子炉冷却系総合試験」全体の試験装置概念を構築した。

1 動燃事業団、大洗工学センター、安全工学部、原子炉工学室

2 動燃事業団、大洗工学センター、安全工学部、機器構造安全工学室

Large-scaled Thermohydraulic Tests Plan for Cooling Systems in Fast Reactors  
- Experimental Models of Reactor Vessel and the Primary Cooling System -

H. Kamide<sup>1</sup>, K. Hayashi<sup>1</sup>, M. Gunji<sup>1</sup>, H. Hayashida<sup>1</sup>, M. Nisimura<sup>1</sup>,  
T. Iitsuka<sup>1</sup>, N. Kimura<sup>1</sup>, M. Tanaka,<sup>1</sup> S. Nakai<sup>1</sup>, H. Mochizuki<sup>1</sup>,  
and Y. Sakakibara<sup>2</sup>

## ABSTRACT

Large-scaled thermohydraulic tests are planned for some new key technologies in the heat transport systems of demonstration fast reactors, in which the reactor vessel, the primary system, the secondary system, water-steam system, and the decay heat removal systems are modeled.

Thermohydraulic issues and structural integrity issues were discussed for the top entry piping systems with satellite pools of the intermediate heat exchangers and the pumps, the natural circulation decay heat removal using direct heat exchangers in a reactor hot pool, the reactor vessel wall cooling system, and the new type of steam generators in the demonstration reactor. Concepts of the experimental model for the reactor vessel and the primary system were created and compared with each other for the sodium test facility which enables to answer the thermohydraulic and structural integrity issues. Following items were considered in the creation and in the selection of the models; 1) solution of the issues for Demonstration First Reactor on total system characteristics, the reactor vessel wall cooling system, the decay heat removal system, and the steam generator, 2) balance between the thermohydraulic issues and the structural integrity issues, 3) simulations of compound phenomena and interactions between the components and the heat transport systems. Total system of test facility was specified based on the selected test model.

---

1 PNC, O-arai Engineering Center, Safety Engineering Division, Reactor Engineering Section

2 PNC, O-arai Engineering Center, Safety Engineering Division, Components and Structure Safety Engineering Section

## 目 次

1. 序論 .....	1
2. 試験課題と装置への要求条件 .....	2
2. 1 热流動上の課題 .....	2
2. 2 構造上の課題 .....	4
2. 3 総合試験 .....	5
2. 4 試験装置への要求条件 .....	5
3. 炉容器及び1次系のモデル概念 .....	9
4. モデル間の比較 .....	12
4. 1 炉容器打ち流動特性 .....	12
4. 2 手動トリップ時炉容器内温度成層化現象 .....	13
4. 3 斜行流型IHX熱流動特性試験への適合性 .....	15
4. 4 炉壁冷却系試験への適合性 .....	16
4. 5 炉容器モデルの構造健全性 .....	17
4. 6 比較のまとめ .....	19
5. モデルの選定、装置全体概念 .....	19
6. 結論 .....	21
謝辞 .....	22
参考文献 .....	23

## 表リスト

表1	試験課題の内容	24
表2	炉容器および1次系モデル概念の総合比較	25

## 図リスト

図1	原子炉冷却系総合試験の主要な熱流動および機器構造にかかる課題	26
図2	炉壁冷却系およびガス巻き込み抑制構造	27
図3	実証炉におけるIHX構造概念	28
図4	炉容器および1次系モデルの候補概念	29
図5	ケースBのモデル概念	30
図6	ケースCのモデル概念	30
図7	ケースDのモデル概念	31
図8	定格運転状態での炉容器上部プレナム内流動場の比較	33
図9	手動トリップ時炉心出口温度および流量の過渡変化カーブ	35
図10	手動トリップ時容器上部プレナム内温度成層化現象の比較	37
図11	手動トリップ時容器上部プレナム内軸方向温度分布の比較	39
図12	各IHXモード伝熱部におけるバッフル板と伝熱管列数の関係	40
図13	炉壁冷却系外部ループ構成のケースB、C間の比較	41
図14	ケースC炉容器モデル構造健全性評価にかかるFEM解析モデル	42
図15	起動試験時の仕切り板まわりの温度分布	43
図16	起動試験時の仕切り板まわりの弾性応力分布（トレスカ応力-外面）	45
図17	SUS316FR銅の底歪み速度での疲労曲線 ( $\dot{\epsilon} = 1.0 \times 10^{-8}$ SEC)	47
図18	炉心部電気ヒーター内臓集合体のメンテナンス方法	48
図19	ケースBおよびCの炉容器およびCの炉容器構造概念	49
図20	各試験モデル概念の構造および年流動課題に対する模擬性の比較	50
図21	原子炉冷却系総合試験装置の全体概略系系統構成	51

## 1. 序論

現在、動力炉・核燃料開発事業団（以下、動燃事業団）では「原子炉冷却系総合試験」として高速炉の実用化を目指し、実証炉段階で採用される原子炉冷却系に係る新概念技術（配管短縮化、機器のコンパクト化、自然循環を重視した崩壊熱除去など<sup>[1]</sup>）の確立を目的とし、原子炉容器から蒸気発生器までの1次、2次冷却系、水蒸気系、崩壊熱除去系を総合的に模擬した大型ナトリウム試験を計画している。本試験で解決すべき主な試験課題は、実証炉の特徴あるいは実用化への方向を勘案し、先行炉までの研究開発や、水あるいはナトリウムを作動流体とした要素試験あるいは小規模な試験では設計法や安全評価法の確立が困難である、(1)容器内温度成層化現象を含む強制循環時の系統熱過渡、(2)自然循環を用いた崩壊熱除去性能、(3)炉壁保護構造性能、(4)蒸気発生器および水蒸気系熱流動である。表1に各試験課題の内容を示す。<sup>[注1]</sup>

本報告では、「原子炉冷却系総合試験」に用いる試験装置の内、原子炉容器および1次冷却系を中心として試験モデル概念を検討した結果を示す。本検討より以前、平成7年度前半までに主に熱流動上の課題解決に的を絞った課題解決方策として、1ループの1次、2次冷却系と1/3セクター形状の炉容器モデルからなる試験装置概念が提案されている。この概念では炉容器壁保護系については、解析の結果から不都合な現象は予測されず、小型ナトリウム試験と流動に関する水流動試験により課題は十分に解決可能であることが明確になったことから、炉容器壁保護系を試験対象から外した。しかし、当初の計画にあった炉容器壁保護系の試験が含まれていない点、構造上の課題への対応が不十分である点から、総合試験として炉容器壁保護系等の各機器構造の要素試験では確認できない複合現象に対する模擬を重視すべきであるとして、試験装置概念を再度検討することにした。

試験モデル概念の検討にあたって留意した点は、上記4つの試験課題全ての充足、熱流動上の課題と構造上の課題をバランス良く解決できる方策とすること、総合試験として各機器構造の要素試験では確認できない複合現象に対する模擬の3点である。

次章以降では、まず、解決すべき試験課題と試験装置への要求条件を整理し、これを具体化する試験モデル概念を数種類構築する。これを比較検討することにより試験モデルを選定し、試験装置全体概念を示す。

---

<sup>[注1]</sup> 水試験で実施可能な自由液面でのガス巻き込み現象、スロッシング現象等については本試験の対象ではない。

## 2. 試験課題と装置への要求条件

### 2. 1 热流動上の課題

原子炉冷却系総合試験が対象とする主な熱流動課題は以下の4点である。

- ・系統熱過渡
- ・自然循環崩壊熱除去
- ・炉壁冷却系（炉壁保護構造）
- ・一体貫流型蒸気発生器および水蒸気系

各課題が対象とする部位を機器構造に係わる課題を含め図1に示す。各課題の内容と試験装置への要求条件について以下に議論する。

#### （1）系統熱過渡

原子炉容器から蒸気発生器（SG）までの全系統にわたる、各種想定事象での熱過渡条件を明らかにし、構造健全性が十分に確保できる範囲にあることを確認する。また、熱過渡評価手法の検証を行う。これに対して以下の試験を行う。

##### ・各種想定事象模擬試験

手動トリップを始めとする各種想定事象を模擬した試験を行い各部での熱過渡条件を把握する。

##### ・炉容器上部プレナム内温度成層化試験

温度成層化現象は熱過渡の評価において有効混合体積を左右する重要な現象であるため、 $Ri$ 数、 $Pe$ 数等の影響を含めて評価手法の確立を図る。

##### ・中間熱交換器特性試験

「もんじゅ」までとは異なる2次側斜行流方式IHXにおける熱交換特性を把握するとともに、評価手法の検証を行う。

##### ・プラント運用試験

水蒸気系の一部である再循環系を用いた崩壊熱除去など、「もんじゅ」にはないプラント運用にかかる知見を得る。

#### （2）自然循環崩壊熱除去

自然循環を利用した崩壊熱除去は、「もんじゅ」ではバックアップ的位置づけであったが、実証炉では受動的安全性強化の観点からより積極的な活用へと進んでいる。また、崩壊熱除去系として、冷却器を炉容器内に浸漬する新しいタイプである直接炉心冷却系（Direct Reactor Auxiliary Cooling System, DRACS）を採用し、2次系を非安全系とともに長期の崩壊熱除去機能の信頼性向上を図っている。DRACSについては、これまでの試験研究により「もんじゅ」の崩壊熱除去系であるIRACS（Intermediatre Reactor

Auxiliary Cooling System) に比べ 1 次系の自然循環流量が少なく（1 %程度）、高温の炉心部の上に炉内冷却器からの低温ナトリウムが存在するため、炉心部での熱流動現象が複雑になることが示されている。[2], [3], [4]

試験としては、以下の項目が挙げられる。

- ・定常自然循環試験

自然循環除熱相当条件での定常試験。自然循環時の熱流動現象の評価手法における炉心部工学モデルの妥当性等を確認する。

- ・全電源喪失模擬試験

全電源喪失とともに過渡事象を模擬した試験。炉心部温度の 2 次ピーク、3 次ピークの評価手法を確立する。

- ・炉容器内自然循環試験

トップエントリー配管系の特殊性に留意し、全ループでのサイフォンブレークを想定した炉容器内自然循環徐熱特性を把握する。

### (3) 炉壁冷却系

実証炉ではトップエントリー配管+多液面システムとなることからトリップの際に、炉容器の液面が大きく変動する。このため「もんじゅ」で採られたようなプロテクションライナー+液位制御方式とすることが困難であり、低温ナトリウム循環方式が検討されている。平成 8 年 4 月時点での設計は図 2 に示すように、中間プレナムからの低温ナトリウムを炉容器壁と外側ライナーとの間に導き上昇させ、潜り堰を通って内側ライナーとの間を下降させ、ガス巻込み防止構造であるリングプレート支持用ライナーとの間を通して再び上昇させ、リングプレート上部で炉容器上部プレナムへ流入させる方式である。

この方式では内側ライナーの外面に沿って暖められ上昇したナトリウムが潜り堰上方で温度成層を形成し、炉容器壁に沿った低温ナトリウムの上昇流との間で不安定な流れを形成すること、並びにアニュラス内に自然体流セルが形成されて周方向に温度分布がつくことが懸念される。現在、日本原子力発電（株）において直径 1m の装置を用いたナトリウム試験が実施されている。[5]

炉壁保護に関する試験としては以下の項目が挙げられる。

- ・炉容器壁冷却系試験

定格定常時、過渡時の潜り堰上部温度成層化、各アニュラス内周方向自然対流発生の有無、構造健全性への影響評価。径方向熱伝達特性評価手法の実証。

過渡時の液面変動、温度成層化にともなう構造材温度追従性の評価。

- ・カバーガス熱伝達特性試験

カバーガスの自然対流伝熱、液面からの輻射、デッキ冷却を含めた容器壁カバーガス部の温度分布評価手法の確立。

#### (4) 一体貫流型蒸気発生器および水蒸気系

新材料の伝熱管を用い、蒸発器と過熱器を合体させた一体貫流型蒸気発生器について、空間温度分布、流動安定性、DNB振動挙動を含めた伝熱流動特性を把握する必要がある。また、実証炉では再循環系を用いた崩壊熱除去を行うため、その特性把握、運用法の確立、熱過渡評価手法の確立を図る必要がある。

試験項目としては以下が挙げられる。

- ・定常／過渡時伝熱特性試験

定常／過渡時のSG内空間温度分布、伝熱相関式、流動安定性、DNB振動挙動を把握し、評価手法を確立する。

- ・水系崩壊熱除去試験

定格定常から再循環系を用いた崩壊熱除去までの過渡特性を把握する。水系の運用法、水系を含めた熱過渡評価手法を確立する。

- ・起動／停止試験

SGへの通水から通常運転下限（30%負荷）までの起動／停止特性の把握と水系の運用法の確立を図る。

## 2. 2 構造上の課題

構造にかかる課題としては「炉容器、炉内構造物、配管、IHX容器・管板等の熱過渡の確認」がある。また、実証炉に特有な構造として、①炉容器壁上部のSGV410（炭素鋼）とSUS316FR鋼との異材継手部、②トップエントリー配管端部でのYピースによる支持構造、③トップエントリー配管ミドルレグのポンプ容器内隔壁貫通部およびコールドレグの炉容器内隔壁貫通部でのスライドジョイント、④低温ナトリウム循環方式による炉壁保護構造、⑤ライナーによるIHX容器壁保護構造、⑥SG水・蒸気側での球形管板などが挙げられる。

これらの構造について熱過渡条件として温度変化データのみを取得し、構造健全性については解析コードにより評価するだけでは、構造健全性評価手法への反映が少ない。さらに、各構造での定常的温度分布および熱過渡による応力、変形の度合い、発生モードについて温度データとともに試験データを取得することにより評価手法の総合的検証を行うことができる。

## 2. 3 総合試験として「予測していない現象」への対応

原子炉冷却系総合試験では、個別の要素試験では十分に把握できないシステムの動特性をナトリウムを用いて総合的に確認する必要がある。言い換えれば、有液面のサテライトプールをもつトップエントリー配管システム、リングプレート、炉上部機構（UIS）下部のホールドダウンプレート、炉壁冷却系などの「もんじゅ」にはない新しいシステム、構造が問題なく機能し、それらの複合効果として予測していない現象が生じないことを確認する必要がある。

特に試験項目を立てる事はないが、実証炉で生じ得る複合現象、各機器間の熱流動、構造を含めた相互作用を模擬し、計測できる試験装置とする必要がある。

## 2. 4 試験装置への要求条件

上記の各試験を行う上で、試験装置に求められる条件を整理する。

### (1) 系統構成

総合試験として炉心から水蒸気系までの冷却系統を模擬する必要がある。すなわち、炉容器、トップエントリー配管、IHX容器、ポンプ容器、2次系配管、2次系ポンプ、SG、水蒸気系、崩壊熱除去系をモデル化する。但しタービンについては50MWSG試験施設と同様に蒸気中に水を注入する減温減圧装置でエネルギー損失を模擬する。

発熱については、自然循環時の流量が系統内温度分布に大きく依存することから発熱部の高さを模擬する必要があり、少なくとも崩壊熱は炉心部で電気ヒーター等により発熱させる必要がある。定格時の熱流動を模擬するためには多大な熱出力が必要となり、コンパクトな炉心に求めることは現実的ではない。従って50MWSG試験施設と同様にLPG等を用いた加熱器を炉心にシリーズに接続する必要がある。

熱輸送システムの全体形状の模擬性では、実証炉の特徴であるIHX容器、ポンプ容器を含むトップエントリー配管系の形状を重視する必要がある。ループ数としては実証炉では3ループ構成であるが、次節に示すようになるべく大きなモデル縮尺が望ましいためループ数を削減したほうが同じコストでは大きな装置ができる。一方で2. 3節で示した総合試験での相互作用を模擬する上では複数ループが望ましい。例えばディーゼル発電機1台の起動失敗事象ではボニーモーターが運転されないループにおいて逆流が生じ、特有な熱過渡が加わることについて試験が可能となる。

### (2) モデル縮尺、熱出力

モデル縮尺について、熱流動上の模擬性の観点から議論する。熱過渡に大きな影響のある温度成層化現象を代表とするプレナム内熱流動について言えば、相似則としてRi数、Re数、Pe数、Gr数等を実機と一致または近付ける必要がある。ナトリウム試験では実機と流

体が同一であるため、モデル縮尺 ( $1/n$ ) と流速比、( $u$ )、代表温度差の比、( $\Delta T$ )でこれらの無次元数が決まるが、Re数、Pe数、Gr数についてはモデル縮尺が小さいほど実機に比べ小さな値となる。従って相似性を向上させるためにはなるべく大きなモデル縮尺とすることが望ましい。

また、モデル縮尺はある相似条件を仮定すれば定格時の熱出力と1対1対応する。すなわち、縮尺を決めれば定格運転の模擬に必要な熱出力が定まる。熱過渡時に重要な温度成層化現象および自然循環崩壊熱除去において、浮力と慣性力の比であるRi数を一致させることが重要である。そこでRi数をモデルと実機で一致させる条件を考えると、()がモデル／実機の比を表すとして、熱出力Qの比、( $Q$ )は以下のように表せる。

$$(Ri) = \left( \frac{g\beta\Delta TL}{u^2} \right)$$

$$1 = \frac{(\Delta T)(L)}{(u)^2}$$

$$(\Delta T) = 1 \text{ とおくと、}$$

$$(u) = (L)^{1/2} = (1/n)^{1/2}$$

$$(Q) = (\text{Flow Area})(u)(\rho)(Cp)(\Delta T)$$

$$(Q) = (L)^2(u)(\Delta T)$$

$$(Q) = (1/n)^{2.5}$$

ここで、( $\Delta T$ )を1としている。これは、SGにおいて水蒸気系の温度を自由に設定することは困難であり、SGの模擬性を考えた場合は水側の温度上昇幅、ナトリウム側との温度差を実機と等しくすることが望ましいことから設定している。

このような相似則をとった場合、Re数の実機との比は以下のようになる。

$$(Re) = \left( \frac{Lu}{\nu} \right) = (L)(u) = (1/n)^{1.5}$$

Re数の歪みの目安として1オーダー (1/10) 以内に抑えるには1/4以上のモデル縮尺が必要となる。また、炉容器上部プレナム内の温度成層化現象を模擬することを考えた場合、実機で6mの液深に対して1/4縮尺ではモデルの液深は1.5mとなるが、縮尺ナトリウム試験装置であるPLANDTLでは2mの液深を持っていることからRe数、Pe数相似性をPLANDTL以上に向上させた試験装置としては、1/3縮尺以上とする必要がある。

また、後に議論するようにIHXやSGの熱流動特性、特に空間分布特性を把握するためには伝熱管の径方向列数がある程度必要であり、これは交換熱量を規定することになる。特にSGでは50MW程度の交換熱量が必要となる。実機3ループ1600MWの熱出力に対して1ループ模擬で50MW程度の出力に相当するモデル縮尺を求めると以下のようになる。

$$(Q) = (50/1600) = 1/3 (1/n)^{2.5}$$

$n \approx 2.5$

すなわち、1/2.5程度のモデル縮尺となる。

以上の検討から原子炉冷却系総合試験装置として、モデル縮尺1/3以上で定格時熱出力として50MW程度を設定する。

### (3) 炉容器モデル形状

熱過渡を模擬する上で炉容器モデル、1次系、2次系内の冷却材熱容量、流速のバランスを実機と合わせる必要がある。例えば、系統として1ループのみを模擬する場合は炉容器側は1/3セクターに対応した流路面積等を持たせる必要がある。また、温度成層化現象などプレナム内熱流動に大きな影響を与えると考えられるガス巻込み防止構造（リングプレート、UIS下部のホールドダウンプレート、図2参照）を模擬する必要がある。

炉壁冷却系を模擬する上では、課題にアニュラス内の周方向自然対流の発生の有無の確認が挙げられていることから、円筒形状の炉容器モデルに炉壁冷却系のライナー構造等を取り付ける必要がある。すなわち、周方向の対流セルの形成に影響を与えるようなセクタ一壁（仕切板）が入った形状にはできない。

構造上の課題に対応して、炉容器壁に発生する応力、変位の発生モードを実機とあわせるためには周方向の拘束条件を一致させる必要があり、やはり円筒形状の炉容器モデルとする必要がある。

全体として、炉心、UIS、炉容器壁、ホットレグ配管の形状、配置について、実証炉との形状相似に留意する必要がある。従ってループ数を削減した場合には、流路面積をループ数に対応させること、円筒形状の炉容器にすること、形状相似の3者のバランスをとる必要がある。

### (4) 模擬炉心

模擬炉心は主に自然循環崩壊熱除去に対応してその模擬性を検討する必要がある。系統構成の節で議論したように、自然循環流量を模擬するためには炉心部で発熱させる必要がある。また、自然循環についての評価項目としては炉心部の空間的な、また過渡時には時間的なピーク温度が重要となる。すなわち、炉心温度の空間分布特性を模擬する必要がある。従ってラッパー管の中に発熱体を有した集合体で炉心を構成し、径方向に数列の模擬燃料集合体を配置することが必要である。集合体の構造としては、ナトリウム中の加熱機構として一般的な電気ヒーターピンを内蔵することが考えられる。実機の集合体内熱流動に関する評価手法として用いるサブチャンネル解析の手法、さらに炉心全体の熱流動場の影響の中で炉心部ピーク温度求める解析手法を試験の評価を通して検証することを考えると、ピンの太さや配列ピッチ、ピン本数は別として実機と同様な三角配列ワイヤースペー

サ-つきヒーターピンで発熱体を構成することが望ましい。模擬炉心の流路面積、発熱部の高さ方向位置については実証炉に対して形状相似とする必要がある。

模擬炉心の発熱量としては、モデルの定格発熱量の5%程度を持たせることにより崩壊熱を模擬することが最低限必要である。全電源喪失事象時の2次ピーク温度を評価するためには、過渡時の1次系統内熱流動の高い模擬性が要求される。過渡事象の初期定常に、炉心ヒーターでなく外部加熱器を用いる場合は、自然循環時の流路内温度分布を模擬するために、スクラム後のフローコーストダウンの過程で加熱器を通る流路から、加熱器をバイパスさせて実機と同じ流路構成へと流路を切り替える必要がある。これまでの検討により、このような流路切り替えは前述した過渡時の1次系統内熱流動の模擬性を損なうことが指摘されている。従って模擬性を向上させるためには、初期定常を炉心ヒーターの発熱のみで達成し流路切り替えなしに過渡を模擬することが有効である。初期定常として定格出力を模擬することは現実的ではなく、PLANDTLでの過渡試験の実績<sup>[6]</sup>によれば、崩壊熱出力の数倍程度でスクラム後の過渡熱流動現象を実効的に模擬することが可能であることから、必要な炉心ヒーター出力はモデルの定格発熱量の10%程度である。

### (5) IHX

実証炉では熱交換性能の向上、伝熱管間温度差の低減を目的として、管内1次、管外2次側バッフル板付き斜行流型のIHXを採用することが検討されている。このようなタイプの熱交換器の流動特性については水流動試験が日本原子力発電（株）にて計画されているが、熱交換特性、伝熱管間の空間温度分布特性については、大型のナトリウム試験を計画する際に可能な範囲で実験データを得る必要がある。このため、試験モデルでは2次側に斜行流が形成される程度の伝熱管の列数が必要となる。

図3に示すように、バッフル板としては内側から円盤タイプ、外側からドーナツタイプのものを張り出す形状である。各バッフル板の形状は実証炉設計と同様に、バッフル板が遮る2次側流路面積をバッフル板がない場合の2/3になるように大きさを調節する。ここで、斜行流は2種類のバッフル板が径方向に重なり合った領域の中で主に生じる。従って斜行流の特性を模擬するためには、この領域に入る伝熱管列数を最低4列程度とする必要がある。このようにしたとき全体で径方向の列数は最低10列が必要となる。

熱交換部、IHX容器については、実証炉に対して形状相似に留意する必要がある。

### (6) SG

実証炉のSGの熱流動特性を把握するためには、特に水側の流動安定性を含む2相熱流動特性の模擬の観点から実機に対して伝熱管レベルでの形状（直径、流路長さ、コイリン

グ条件)、ナトリウム側、水側の温度レベル、流速を一致させることが必要である。従つて、SG全体としては、水平断面内的一部分を切り出した軸方向実寸大の部分モデルとする必要がある。このことは、SG以外のコンポーネントを縮尺モデルとした場合、高さ方向に縮尺がSGのみ異なることを意味する。また無次元時間の観点からは、他のコンポーネントでは

$$(t) = (L/u) = (1/n)^{1/2}$$

であるのに対し、SGでは長さと流速が実機と一致するため

$$(t) = 1$$

となり、ここでも歪みが生じる。これらは、熱過渡、自然循環の模擬において十分に留意する必要がある。

また、ダウンカマーが無い点を含めて1体貫流型蒸気発生器の空間温度分布特性を把握するためには、シュラウドに接する伝熱管を除いて径方向に3から4層程度のヘリカルコイル層数が必要であることから、トータルとして最低5層の伝熱管コイリング層数が必要となる。これから伝熱管の本数が決まり、さらに一本あたりの流量、エンタルルピー上昇幅が実機と同一であることから、SGの熱交換量が規定され、50MW程度が最低限必要となる。

### 3. 炉容器及び1次系のモデル概念

2章で示した試験装置への要求条件を踏まえ、試験モデルの候補概念を以下の4ケース構築した。

ケースA：3ループモデル

ケースB：全周2ループモデル

ケースC：1/3セクターモデル

ケースD：偏心1ループモデル

各ケースの炉容器モデル形状と概要を図4に示す。各ケースにおけるモデル化の考え方は以下の通りである。

#### <ケースA：3ループモデル>

1次系、崩壊熱除去系のループ数を実機と合わせ、原子炉容器内の形状を完全に実機と相似にする。これにより1次系内の各構成機器間の熱流動的、構造的相互作用を含めて総合的な現象の模擬を行う。すなわち、総合試験として「予想されない現象」にも対応できる装置を指向する。

2次系については、その模擬に必要な出力の膨大さの観点からSGを1基とし、IHXからの3ループを1ループに集約してSGに接続させる。このような合流、分岐流路は実機ではなく、モデルに特有な構造となる。

SGの出力を50MW程度とし、これを炉容器モデルの定格出力とすると、 $(Q) = (1/n)^{2.5}$ よりモデル縮尺は1/4となる。後に他のモデルと比較して示すが、モデル縮尺が小さい場合、IHXの大きさが小さく、伝熱管列数が少なくなることから、斜行流を含むIHX内熱流動場の模擬性が悪くなる。

#### <ケースB：全周2ループモデル>

円筒形状の炉容器にすることを重視しつつ、炉心からUIS、炉容器壁へ向かう基本的に中心対称的な速度場を模擬するようにループ数を削減することを考える。このとき、実機にないセクター壁を設けないようにする。以上を満足する形状として、流動場の中心対称性を確保できる最低ループ数を考え1次系を2ループ構成とする。ケースAと同様にSGは1基とし、2次系で2ループを1ループに集約する。

図5に示すように、ループ側と炉容器側の流路面積比を合わせるため、全周縮尺モデルの2/3セクター（2ループ分）に対応する水平断面積をもつような円筒容器とする。このとき、高さ方向は元の縮尺モデルと同一とする。炉容器モデルの鉛直断面について見ると、アスペクト比が実機と異なり縦長となる。また、1/3セクター内にあったホットレグ、DHX（崩壊熱除去用の炉内冷却器）等の構造物が1/2セクター内に配置されることになる。従って、炉容器内の基本的流動場は模擬されるものの、容器の形状、炉内構造物の配置について形状の相似がある程度損なわれる。

モデル縮尺はSGの熱交換量（50MW）を上回る炉容器モデルのスケールとする必要があり、出力のスケール則、 $(Q) = 2/3 (1/n)^{2.5}$ から1/3.4となる。ここで、定格出力状態の模擬は熱交換器の熱流動特性が模擬される限り、必ずしも重要ではないと考えられる。そこで、数字を丸めてより大きなモデルを指向し、モデル縮尺を1/3とする。このとき炉容器のスケール上の定格出力は64MWとなり、SGに合わせて最大出力を決めた場合、定格の約80%部分出力まで模擬できることになる。ここで、もう一度100%の出力を持たせる必要性を考える。定格定常状態ではプレナム内は等温となり流動場の模擬が重要となる。Re数の比 $(Re)=(L)(u)$ を考えると1/3スケール、100%出力状態では実機の1/5.2程度となるが、80%出力条件では流速が0.8倍となり、1/6.5程度となる。実機が高Re数で乱流条件であることを考えると、この差が流動場に与える影響は小さいと考えられる。過渡時の模擬については、スクラン後のポニーモーター流量、崩壊熱は100%模擬条件からのものと同等に設定することができ、フローコーストダウンカーブについて過渡の初期（2秒程度）

にわずかな不正が生じても全体としては模擬性は十分に確保できる。

2次系を2ループから1ループに集約する点については実機にない構造を持ち込むことになり、その影響を検討する必要がある。定格運転時の模擬については、2次系の2ループを対称配置とともに、それぞれにバルブを設けることにより流量配分を設定することができる。定格から自然循環への過渡試験では、SGでの除熱量がゼロとなり、2次系の自然循環流量が極端に低下した場合には2次系のループ間で流量振動等が生じる可能性もあるが、その場合にはバルブを閉めきり、自然循環を停止する等により影響を小さくできるであろう。また、2ループ構成であることから1ループポニーモーター不作動などのループ間非対称試験も可能であるが、その場合は2次系の運転方法について、健全ループ側ではポニーモーター流量を模擬し、ポニーモーター不作動ループ側は本来自然循環となるが、保守側にバルブで締め切る等の工夫で現象を模擬できると考えられる。

円筒炉容器モデルであるため、炉壁冷却系構造と上部プレナム内の流動上、構造上の関係を実機と同様に設定でき、複数ループ、炉内構造物間の相互作用を含めた総合試験としての模擬性は高いと考えられる。

#### <ケースC：1/3セクターモデル>

1次系ループ数をさらに削減して1ループとする。これに対応して炉容器側は1/3セクターに相当する流路面積等を持つ必要がある。そこで、図6に示すように、実機のある1/3セクターを取り出し、忠実に形状を模擬する。炉容器モデルの形状としては円筒とし、1/3セクターを分離させるために炉壁冷却系の内側ライナーまでを仕切る板を設ける。このとき、実機では1次系3ループに対して崩壊熱除去系が4ループあるため、他のセクターでは炉内構造物配置が異なっており、1/3セクターモデルでは炉容器全体としての形状模擬性が高いわけではない。仕切板の構造としては、試験の品質を高める上で境界条件が明確である必要がある。流動上は仕切り板と壁のすき間等の漏れ流量が問題となるため、リーグタイトな溶接構造とする。熱の観点からは断熱条件となることが望ましいが、仕切り壁を隔ててナトリウムが向かい合う形では過渡試験時に両者に温度差がついて熱が移行することが考えられる。そこで、図6に示すように、1/3セクター内で行う熱過渡、自然循環等の試験では2/3セクター側のナトリウムおよび炉壁冷却系の内側ライナーより外側のナトリウムをドレンし、ガス空間とすることで断熱性を高める。炉壁冷却系の試験を行う場合には全体にナトリウムを満たして試験を行う。このとき、2/3セクター側についてもナトリウムを流す必要があるため、出入口配管系統を設ける。

このように、仕切り板を設けることで、実機にはない構造を持ち込むことになり、プレナム流動への影響、仕切り板と壁面との溶接部の構造健全性、炉容器への応力発生について実機にない周方向温度分布の影響、新たな構造物を設けることで実機にはない複合現象

の発生などの課題が生じることになる。

モデル縮尺は、SGの出力を50MW程度とし、これを炉容器モデルの定格出力とする  
と、 $(Q) = 1/3 (1/n)^{2.5}$  より  $1/2.5$  となる。

#### <ケースD：偏心1ループモデル>

ケースCと同様に1次系ループ数を1とし、 $1/3$ セクターの流路面積を保存する大きさの円筒形状炉容器モデルに接続する。図7に示すように、炉内構造物の配置上のバランス、 $1/3$ セクターの形状をなるべき模擬することを考え、円筒の炉容器に対して偏心させてホットレグ配管、DHX等を配置し、その反対側に模擬炉心を置く。

リングプレートは容器壁に沿って全周に設置するが、UISを炉心の上に配置することから炉心側では径方向に狭いプレートを置くことになる。炉心側のセクターについては実機との形状相似は全くないモデルとなる。

モデル縮尺はケースCと同様に $1/2.5$ となる。炉容器モデルについては高さ方向に $1/2.5$ スケール、炉容器半径方向は $1/3$ セクター相当の水平断面積を持つために直径換算で $1/4.3$ スケールとなり実機に比べ極端にアスペクト比が異なる。

## 4. モデル間の比較

### 4. 1 炉容器内流動特性

強制循環状態（定格出力運転）における炉容器モデル上部プレナム内の流動場を解析結果に基づいて各ケース間で比較する。解析には汎用の3次元熱流動解析コードを用いた。解析手法の概要は以下のとおりである。

- ・乱流モデル： k-ε 2方程式モデル
- ・計算アルゴリズム： SIMPLE法
- ・圧力方程式行列解法： ICCG法
- ・対流項差分法： 1次風上法
- ・拡散項差分法： 1次風上法
- ・時間積分法： RRK法（2次精度）

ケースAについては、形状が完全に相似であるため、模擬性については問題ないと判断し、解析はしない。但し、レファレンスとして実機に形状が近い1ケースを加える。各ケースに対する解析メッシュ体系は以下のとおりである。

- ・レファレンス： $1/3$ セクターモデルとし、セクター壁は周期境界条件。従って全周3ループ相当の体系となる。

- ・ケースB：対称性から1/2セクタ一体系。セクター壁は周期境界条件。
- ・ケースC：1/3セクタ一体系、セクター壁はフリースリップ境界。
- ・ケースD：フルセクタ一体系。

解析結果を図8に示す。レファレンスの全周3ループ相当モデルの結果を見ると、炉心から出たジェットは全ての縦断面でリングプレートの中に入り、上方へ抜けている流れは少ない。わずかにDHXに当たって上方へ抜けている流れが見られる程度である。水平断面ではリングプレートのすぐ下の高さで、周方向0度のセクター壁を抜けてホットレグ配管へ向かう流れが顕著に見られる。

ケースB（全周2ループモデル）では、縦断面、水平断面とともに、レファレンスケースと同様な流れ場が形成されていることがわかる。ホットレグ配管断面にて、炉容器モデルの直径が小さい影響で、炉心からのジェットがわずかに低い位置で炉容器壁に当たっている点が違いとして挙げられる。

ケースC（1/3セクターモデル）では、特に周方向0度、120度方向の縦断面において、炉心からのジェットにレファレンスケースとの違いが見られる。これには仕切り板によって周方向の流れが0度、120度断面で制限されていることが大きな影響を及ぼしていると考えられる。特に120度断面ではジェットがリングプレートの上部に抜ける流れが顕著に見られ、プレナム内の混合過程に大きな影響があると考えられる。

ケースD（偏心1ループモデル）では、全ての縦断面において炉心からのジェットがリングプレートの中に入っている点ではレファレンスケースと一致している。しかし、炉心のある方向の周方向位置では、炉心と容器壁が近いために、炉心からのジェットと容器壁の関係がレファレンスケースと大きく異なっている。元々、1/3セクターに相当する水平断面内領域を円筒炉容器モデルにしており、これら炉心側のセクターは混合ボリュームの寄与としてレファレンスケースの0度とホットレグ配管の間の領域ならびにコールドレグと120度の間の領域に相当する。従ってこのような流況の違いはプレナム内の混合過程に大きな影響があると考えられる。周方向の流れについてみると、レファレンスケースではDHXとコールドレグの間で淀んでおり、ここから周方向左右に分かれ、それぞれホットレグ配管に流れているが、ケースDではDHX、コールドレグから離れた周方向位置であるホットレグ配管の180度反対側を淀み領域としてそこから左右に分かれる流れとなっている。以上の結果から判断するとケースDにおいて、強制循環での流れ場の模擬性は非常に低いといえる。

#### 4. 2 手動トリップ時炉容器内温度成層化現象

手動トリップ時の熱過渡においてプレナム内の温度成層化現象は有効混合体積を左右し、ループの温度応答に影響を与える重要な現象である。ここでは、各ケースでの手動ト

リップ時炉容器内温度成層化現象を解析により比較する。各ケースの解析手法、メッシュ体系は前節と同様である。ケースAについてはスケールが小さいことによるRe数、Pe数相似性の低下が懸念されるが、形状については完全に実機と相似であり総合試験として有利である点、実機に対するRe数、Pe数の低下の度合いがスケールの最も大きいケースC、Dで1/4であるのに比べ1/8であり、高々2倍の違いであることを考慮して、模擬性は悪くないと判断する。これまでの検討において、成層化現象では浮力支配の流れ場で水平断面内形状の影響が出にくく、セクター壁があることの影響が小さいために、ケースC(1/3セクターモデル)では、全周3ループ体系と同様な温度成層化現象が生じることが報告されている。そこで、モデルの形状模擬性が低いケースB、ケースDについてケースCの解析結果と比較することにより、成層化現象の模擬性を議論する。図9に手動トリップにおける炉心出口での流量、温度変化カーブを示す。

スクラムから1200秒後の炉容器モデル内温度分布、速度場の解析結果を図10に示す。レフアレンスであるケースC(上段、1/3セクターモデル)の解析結果を見ると、リングプレートのある断面高さに成層界面が形成されている。炉心出口からのジェットはリングプレートの下部に押さえ込まれ、成層界面に直接ジェットが当たっていない。ケースB(2ループモデル)の結果をケースCと比較すると、成層界面の位置、炉心からのジェットを含む流況ともにケースCと良く一致していることがわかる。一方、ケースD(偏心1ループモデル)では、成層界面の位置はケースCと一致しているものの、ホットレグ配管下方で下向きの速い流れが見られ、流況が大きく異なっている。ケースCでは炉心から1/3セクターに流れ出ていた同じ流量がケースDでは全周に流れ、これが炉容器の壁に沿って周方向に回った末にホットレグ配管に到達する。このためケースDではホットレグ配管に向かって周方向左右から速い流れがぶつかり、ホットレグに流れきらずに行き場を失った分が下方にジェットを形成していると考えられる。

スクラムから600秒後、1200秒後の上部プレナム内軸方向温度分布を各ケースで比較した結果を図11に示す。成層界面下部の温度勾配においてケースDのみ他のケースに比較して大きくなっている点を除いて、界面位置、界面内最大温度勾配とともに各ケースの結果は良く一致している。

以上から温度分布においてはケースB、DともにケースCと変わらず、模擬性は高い。但し、ケースDにおいては成層界面下方の強制対流場の流況が大きく異なっている。ケースCで温度場に差異がなかったのはリングプレートの存在により成層界面近傍の流速が抑えられ、炉心からのジェットを含む流況の影響が小さくなっているためと考えられる。リングプレートについては今後の設計によっては見直しがある可能性があり、流れ場を模擬していないケースDは成層化現象について模擬性が低いと言える。これに対してケースBは温度場、流れ場ともに高い模擬性を有していると言える。リングプレートの影響を含

め、各ケースの温度成層化現象に関する詳しい検討結果が文献[7]に報告されている。

#### 4. 3 斜行流型IHX熱流動特性試験への適合性

2. 4 (3) 節で示したように、斜行流型IHXの熱流動特性を模擬する上である程度の径方向伝熱管列数が必要となる。各ケースではモデル縮尺が異なっており、IHX 1基あたりの交換熱量、ひいてはIHX伝熱部の大きさもモデル縮尺に依存して異なる。

ここで、伝熱部の大きさとモデル縮尺( $1/n$ )の関係を整理する。2. 4 (2) 節で示したように出力のスケール則は、 $(\Delta T) = 1$ すなわち実機と同じ温度条件およびRi数一致の条件の下で、 $(Q) = (1/n)^{2.5}$

で表される。一方、伝熱部での熱交換量の比は

$$(Q) = (H) (A_{hx}) (\Delta T)$$

として表される。熱伝達係数の比( $H$ )を1と仮定すると、出力のスケール則との一致から伝熱面積の比( $A_{hx}$ )は次のように表せる。

$$(A_{hx}) = (1/n)^{2.5}$$

ここで、実機の斜行流場に対する熱伝達率を得る上でモデルから実機への適用性を向上させるためにモデルの伝熱管の水平断面形状、寸法およびその配列ピッチを実機と同じとする。 $1/n$ スケールモデルでの伝熱管本数の実機との比は伝熱管の入るシュラウド内の水平断面積の比が $1/n^2$ になるため、約 $1/n^2$ になると考えられる。伝熱管の長さの比が $1/n$ となることから伝熱面積の比は $1/n^3$ となり、先の出力のスケール則からえた値は $(1/n)^{0.5}$ だけこれより大きい。この伝熱面積の差を伝熱部のスケールを調整することで吸収する場合、

$$(1/n')^3 = (1/n)^{2.5}$$

$$(1/n') / (1/n) = (1/n)^{2.5/3 - 1} = n^{1/6}$$

すなわち、出力のスケール則を満足させるには、熱交換機の伝熱部の縮尺( $1/n'$ )は全体のモデル縮尺( $1/n$ )より $n^{1/6}$ 倍だけ大きくする必要がある。全体のモデル縮尺が $1/2.5$ の場合には熱交換部は1.16倍大きくなり、 $1/2.15$ の縮尺となる。この歪みは全体モデル縮尺が小さくなるほど顕著になる。 $1/4$ スケールの場合、1.26倍大きくする必要がある。

このような考え方で設定した各ケースのIHX伝熱部を図12に示す。モデル縮尺が $1/2.5$ となるケースC, Dでは径方向の伝熱管列数が11列となり、十分な空間模擬性が確保できる。ケースBではモデル縮尺が $1/3$ となり、伝熱管列数が10列ある。内側バッフル板の外側には約2列が確保されているが、周方向に列数の依存性が生じている。ケースAでは、

モデル縮尺が1/4となり、伝熱管列数が7列となる。内側バッフル板と外側バッフル板に挟まれた斜行流となる領域には伝熱管列数が2または3列しかない。また、内側バッフル板の外側の伝熱管は1または2列で周方向の依存性が大きくなる。

以上の検討から、ケースA（3ループモデル）では斜行流型IHXの熱流動特性を把握することは困難である。ケースB（2ループモデル）では、ケースC, Dに比べて模擬性が劣るもの、特性の把握が可能であると考えられる。そのためには、モデルの定格出力50MWに対して25MWの交換熱量を持ったIHXにするのではなく、図に示したようなモデル縮尺1/3に対応した34MWのIHXとする必要がある。また、IHX特性試験時にはPe数相似性を確保するために、1ループのみを用いた運転により34MWのフルパワーでの熱交換条件を設定できるようにする必要がある。

#### 4. 4 炉壁冷却系試験への適合性

ケースA（3ループモデル）、ケースB（2ループモデル）では全周の炉容器に炉内構造物がバランス良く配置されており、炉壁冷却系構造をモデル化する場合、中間プレナムから壁冷部2重アニュラス、リングプレート外側アニュラスを通して上部プレナムへ抜ける流路形状を模擬することができる。従って、リングプレート近傍でのサーマルストライピング現象を含めた炉壁冷却系と上部プレナム内熱流動場の相互作用、複合現象を十分に模擬できると考えられる。

炉壁冷却系への入口流路については全てのケースにおいて実機と同様に中間プレナムから炉壁冷却系外側アニュラスへ供給することが可能であるが、入口温度、流量の調節、周方向流量配分の調節ができないため重要な課題である炉壁冷却系アニュラス内の自然対流発生に関して試験パラメータが少なくパラメトリックな検討ができない。そこで、外部ループを設け、リングヘッダ、流量計、バルブを介して炉壁冷却系外側アニュラスへナトリウムを供給する方式とする。

ケースCでは、図6に示したように炉壁冷却系試験とその他の試験で2/3セクター部を使い分ける必要がある。すなわち、1/3セクターのみを使う熱過渡、自然循環など試験時には2/3セクター内のナトリウムをドレンし、仕切り板の断熱性を高める。このとき、実機と同じようにリングプレート外側アニュラスと炉壁冷却系内側アニュラスをフローホールで結ぶと、炉壁冷却系アニュラスを通じて2/3セクター側と1/3セクター側が繋がってしまい、片方だけをドレンすることができない。このため、図13に示すように炉壁冷却系アニュラスから一旦容器外ヘループを引き出し、流路を閉じることができるようにバルブを設けたうえで炉容器内に再びループで戻す必要がある。さらに、炉壁冷却系アニュラスの液位は炉容器側へ戻る際の流動抵抗で決まるため、前開時のバルブ流動抵抗によっては圧力損失の増加分を補償するために電磁ポンプを設ける必要がある。以上に示したように、

ケースCでは炉壁冷却系アニュラスと炉容器内を配管、バルブ、ポンプを介してつなげるため両者の流動場が分離されてしまい、総合試験として炉壁冷却系と炉容器内との熱流動的相互作用、複合現象の模擬性が低い。また、炉壁冷却系の外部ループが非常に複雑となる。また、仕切り板とライナーが溶接されているため熱応力によるライナーの変形が懸念され、周方向の対流セル発生に影響を及ぼす可能性がある。

ケースDでは、炉容器壁と炉心との距離が周方向依存性をもっている。従って図8に示したように炉壁冷却系の最内層となるリングプレート支持ライナー近傍の流れは実機にはない大きな周方向依存性をもつ。また、リングプレートの水平断面内の幅も実機にはない大きな周方向依存性もっており、炉壁冷却系出口の流れに影響を与える可能性が高い。従ってケースDは、リングプレート近傍でのサーマルストライピング現象を含めた炉壁冷却系と上部プレナムの相互作用、複合現象に関する模擬性が低い。

#### 4. 5 炉容器モデルの構造健全性

試験装置は実機の1/4から1/2.5程度のスケールモデルとなるため、基本的に熱応力は小さくなり、構造健全性上は楽になる方向である。しかし、ケースCだけは炉容器内に実機にはない仕切り板を設け、1/3セクター内で試験を行うモードがある。この場合には炉壁冷却系の内側ライナーの周方向温度分布により、平板状の仕切り板と炉壁冷却系の内側ライナーのT型接合部に大きな熱応力が発生する。

予備的検討の結果、最も厳しい応力の発生する試験条件は低温待機条件から定格運転への起動試験であることが予測された。起動試験では、2/3セクター側の炉壁冷却系の内側ライナー、上部プレナム底板は初期の200°Cにはほぼ保たれる一方で、1/3セクター側のライナー、上部プレナム底板、仕切り板は約24時間で550°Cまで昇温される。このため大きな熱応力が仕切り板とのT型接合部に生じる。

この試験条件に対してFEMコードを用いて温度分布解析、構造解析を行った。解析モデルを図14に示す。対称条件により180度セクターモデルとし、炉壁冷却系の内側ライナー、上部プレナム底板、仕切り板をモデル化している。ナトリウムの昇温カーブは初期の200°Cから24時間で直線的（15°C/hour相当）に550°Cまで上昇するものとした。境界条件としては、ナトリウムに接している構造材はナトリウムの昇温カーブに従って温度上昇するものとした。ナトリウムに接していない2/3セクター側の内側ライナー、上部プレナム底板については熱伝導および高温となる仕切り板からの輻射を考慮した。輻射については簡易的評価とし、以下のように設定した。

$$q'' = \sigma \xi (T_s^4 - T_c^4)$$

$q''$  : 热流束

$\sigma$  : ボルツマン定数 ( $5.669 \times 10^{-8}$ )

$\xi$  : 放射率 (ステンレスの輻射率を0.2とし形状を考慮した、0.047)

T<sub>c</sub> : 2/3セクター側各部の構造材温度

T<sub>s</sub> : 仕切り板温度 (ナトリウム温度)

また、これらの構造材外面については断熱とした。2/3セクター内のカバーガスの自然対流による伝熱は無視した。

まず、最も高い応力が発生した時点（昇温開始から15.5時間後）での体系内温度分布を図15に示す。最も低温のライナー部とナトリウム接液部の間には120°Cの温度差が生じている。この時の応力分布を図16に示す。仕切り板とライナーのT型接合部上端および同接合部の下端（底板を含めた3者が接合する点）において高い応力が発生している。各部の（1次+2次）応力強さ範囲（S<sub>n</sub>）および実証炉用高温構造設計基準であるDDSの評価（局所の歪み集中は考慮せず）で求めた歪み範囲（ε<sub>t</sub>）を以下に示す。

部位	応力範囲 (S <sub>n</sub> )	歪み範囲 (ε <sub>t</sub> )
接合部上端	65 kg/mm <sup>2</sup>	0.85%
接合部下端	60 kg/mm <sup>2</sup>	0.75%

最大歪み範囲は0.85%となった。これを元に構造成立性を議論する。

実機と同じ316FR鋼で炉容器モデル構造部材を構成するものとする。試験施設では実機と異なり定格での高温保持時間が試験一回あたり1日程度と短く、クリープ損傷は疲労損傷に比べて顕著ではないので、疲労損傷により構造健全性を評価する。時間消耗則に基づくクリープ疲労損傷評価により316FR鋼用に策定した疲労線図(c) ( $\varepsilon < 1 \times 10^{-6} / \text{sec}$ 、図17参照) を評価に用いるものとする。歪み範囲が0.85%のときの許容回数は、図に示すように、最適（平均）疲労曲線では約500回、設計用疲労曲線では23回程度である。

以上の検討の結果、ケースC (1/3セクターモデル) では仕切り板と炉壁冷却系内側ライナーとの接合部において大きな熱応力が発生し、起動試験に相当する熱過渡に対し許容回数はノミナル値ベースで数十から数百回程度であることが示された。局所的な歪みや応力集中の影響は考慮されておらず、今回の検討の範囲では安全率を考慮した実プラント相当の評価では、構造健全性が確認されていない。この部位はナトリウムバウンダリーではなく、亀裂が入った場合でもナトリウム漏洩には直接つながらない。また、亀裂が入ってから板厚を貫通するまでに数百回の熱過渡の繰り返し余裕がある。しかし万が一、貫通してナトリウムが2/3セクター側に漏れだす状況になった場合、試験施設が補修のため長期

間運転停止になることは設計の妥当性を示す総合試験の主旨から考えて好ましくない。また、試験の実施上も熱過渡の低減に常に留意する必要があり、試験の自由度を損ねる可能性がある。

#### 4. 6 比較のまとめ

以上の検討をまとめ、系統熱過渡試験等の試験課題に対する充足性、装置としての構造健全性、炉心ヒーターのメンテナンス性、原子炉容器の改造に対する柔軟性、経済性の観点から各ケースを比較した結果を表2に示す。炉心ヒーターのメンテナンス性については、模擬燃料集合体を下部の管板で切り離し、予めUISを引き抜いておいてそこから上方へ集合体を引き抜いて炉容器モデル外へ取り出すことによりメンテナンスを可能とする。構造概念を図18に示す。ケースC(1/3セクターモデル)では、仕切り板を連続構造とし、120度扇形のUISを上部からフランジ取り合いで挿入するものとする。図19にケースB、CのUISを含む炉容器モデル構造を比較して示す。

各ケースでの評価を総合すると、ケースAはIHXの熱流動特性を除いて高い模擬性を有するが、コストが高くなる。ケースBはIHXの熱流動特性の把握に工夫が必要であるが、総合的評価は高い。ケースCは仕切り板の構造健全性を確保するために形状等の工夫が必要であり、炉壁保護系性能試験など一部の試験課題の充足性に問題がある。ケースDは炉容器の形状模擬性がなく、現象の模擬性が低い。このため、総合試験として見たときの実証性が低い。各ケースの模擬性を熱流動上の課題、構造上の課題の2本の軸で比較した結果を図20に示す。ケースBは熱流動上の課題と構造上の課題についてバランスのとれた解決方策と見ることができる。

#### 5. モデルの選定、装置全体概念

4章での比較によりケースB(2ループモデル)とケースC(1/3セクターモデル)の優位性が明らかとなった。炉容器内の複合現象の総合的な模擬の観点から実機にない構造として仕切り板をもつケースCよりもケースBの模擬性が高いこと、仕切り板にともなう構造健全性の課題、損傷した場合の影響を考慮し、ケースBを原子炉冷却系総合試験の炉容器モデル、1次系の概念として選択する。

ケースBを基本として、加熱器、SGを含む装置全体の概略系統を図21に示す。原子炉容器、2ループの1次Na系、崩壊熱除去系、炉壁冷却系外部ループ、2ループから1ループへ集約した2次Na系、1基のSG、2次系空気冷却器、水蒸気系、炉容器の定格出力を模擬するためのNa加熱器系からなる。

2次系空気冷却はSGの運転の自由度が低いことから炉容器、1次系での試験の柔軟性

を確保し、SGを運転しないで試験を可能にするために設ける。徐熱容量は15MW程度とする。

加熱器には1次系ポンプから分岐した流路から流入させ、炉心部へ高温ナトリウムを戻す。自然循環時に加熱器をバイパスさせるための系統を有するとともに、スクラム時の流路切り替えにともなう過熱防止用冷却器の系統をもつ。また、SGの単体試験を可能とするために2次Na系へも接続する。

水蒸気系には、実証炉を模擬した再循環系を設ける。タービンは模擬せず、50MWSG試験施設と同様に蒸気中に低温水を混入させる多段の減温・減圧装置を設ける。復水器の2次側には冷却塔をおき、50MWの熱を大気に最終放散させる。

系統を構成する上での課題は、2次系に実機にはない2ループから1ループへの合流、分岐構造が入ること、SGの鉛直方向縮尺が実寸大でモデル全体縮尺(1/3)と不整合がある点である。また、系統構成上、実機にはないバルブがいくつか必要となる。従って、特に自然循環の模擬に留意して2次系配管引き回し、コンポーネントの配置を計画する必要がある。

また、IHXの模擬性を向上させるためには、伝熱管の列数を多くする必要があるが、伝熱部の形状歪み(縮尺率が大きくなる)の問題を含めて解決する方策として、伝熱管の直径を実機より小さくすることにより単位体積あたりの伝熱面積が大きくなるとともに、伝熱管の列数も増やすことができる。模擬IHXの設計において伝熱管の直径をパラメータとした検討を行うことも有効であると考える。

## 6. 結論

実証炉における構造及び熱流同上の主要な課題として①系統熱過渡、②自然循環崩壊熱除去性能、③炉壁保護構造性能、④一体貫流型蒸気発生器と水蒸気系熱流動の解決を図るとともに、原子力長計に示された「FBR固有の技術」を確立を念頭に置き、原子炉冷却系総合試験にかかる原子炉容器および1次冷却系のモデル概念を検討した。モデルの検討にあたっては、上記4つの試験課題全ての充足、熱流動上の課題と構造上の課題の両者を解決できる方策とすること、総合試験として各機器構造の要素試験では確認できない複合現象に対する模擬の3点に留意した。モデルの候補として以下の4種類を検討した。

- ・ 3 ループモデル
- ・ 2 ループモデル
- ・ 1/3 セクター モデル
- ・ 偏心 1 ループモデル

課題の解決策としての各モデルの適合性、試験装置としての構造健全性について解析コードを用いた定量的評価を行うとともに、試験方法、ループ構成を含めた広範囲な比較・検討を実施した。各ケースでの評価を総合すると、ケースAはIHXの熱流動特性を除いて高い模擬性を有するが、コストが高くなる。ケースBはIHXの熱流動特性の把握に工夫が必要であるが、総合的評価は高い。ケースCは仕切り板の構造健全性を確保するために形状等の工夫が必要であり、炉壁保護系性能試験など一部の試験課題の充足性に問題がある。ケースDは炉容器の形状模擬性がなく、現象の模擬性が低いため、総合試験として見たときの実証性が低い。

以上の比較検討の結果、総合試験として見たときの複合現象を含む模擬性の高さ、熱流動上の課題と構造上の課題に対する解決方策としてバランスの良さから、2 ループの1次系と円筒形状の炉容器を有する「2 ループモデル」を原子炉冷却系総合試験装置の基本概念として選定した。これに基づき、原子炉容器から蒸気発生器、崩壊熱除去系、水蒸気系、ナトリウム加熱器系にいたる全系統の構成を検討・構築した。

## 謝辞

原子炉冷却系総合試験にもちいる試験装置の検討に当たり、炉容器モデル内の熱流動現象に関する議論、予測解析、仕切り板構造にかかる検討、炉容器の構造健全性に関する検討、予測解析、炉壁保護構造内の熱流動現象に関する議論について、高速炉製作メーカー各社の技術者の方々に貴重な参加を頂いた。ここに深く感謝いたします。

また、各機器内の熱流動現象とその模擬の考え方等について、基盤技術部、熱流体技術開発室の佐藤和二郎室長をはじめ室員の方々に討議していただき、貴重なコメントを頂いた。ここに深く感謝いたします。

## 参考文献

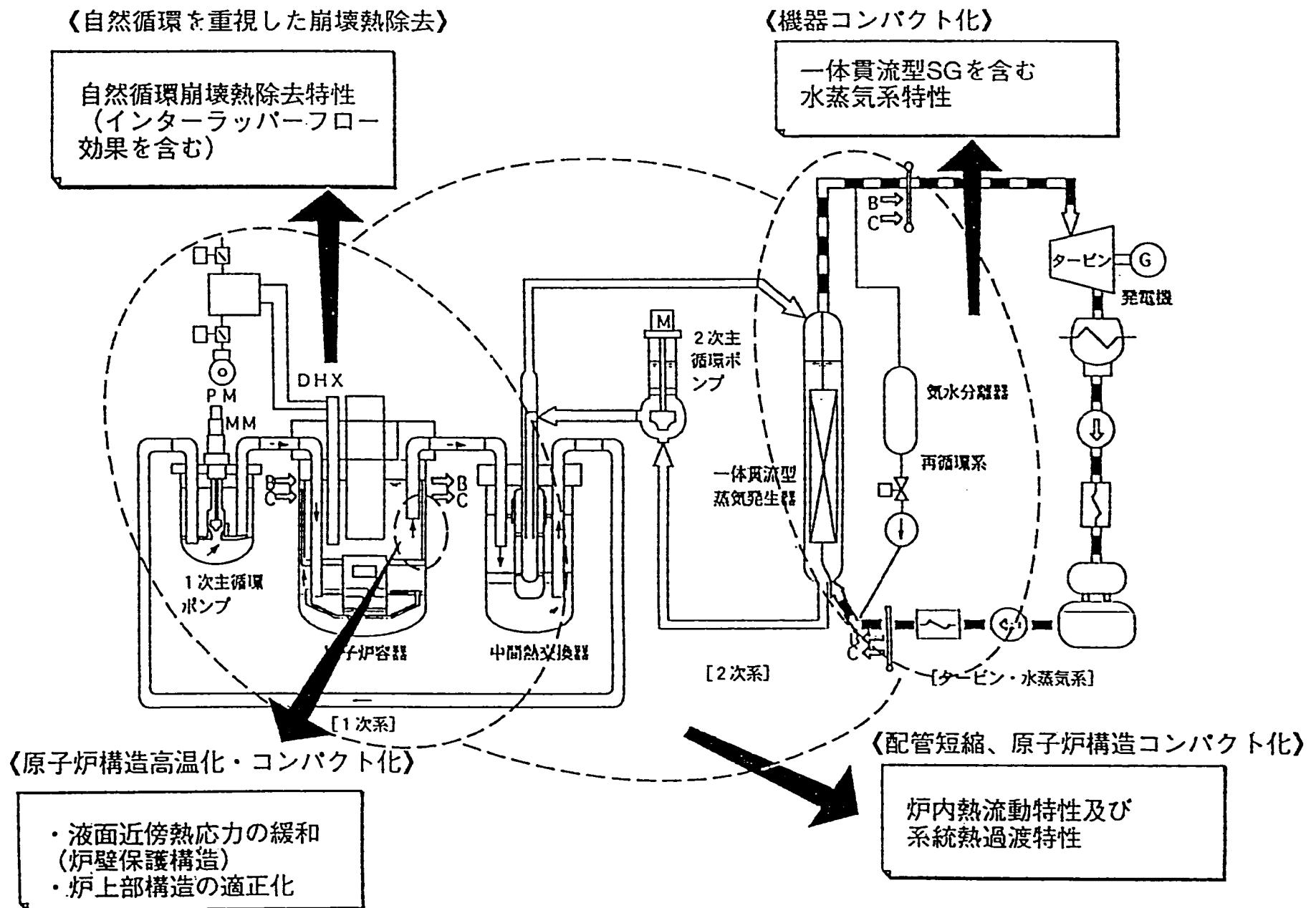
- [1] M. Ueta, T. Inagaki, et al., "The Development of Demonstration Fast Breeder Reactor DFBR)," Proc. of ICONE-3, Kyoto, Japan , Vol.2, p.771 (Apr., 1995)
- [2] D. Weinberg, K. Rust, H. Hoffmann, H. Hayafune, et al., "Transient NEPTUN experiments on passive decay heat removal," Proc. of the 3rd JSME/ASME Joint International Conf. on Nuclear Engineering (ICONE-3), Kyoto, Japan, Vol.1, pp.519-524 (1995, Apr.)
- [3] J. Kobayashi, et al., "Study of Mixed Convective Flow Penetration into Subassembly from Reactor Hot Plenum in FBRs", Proc. of NURETH-7 (Sep., 1995)
- [4] 上出英樹他、「高速炉の自然循環除熱時におけるインターラッパーフロー現象の評価」、日本原子力学会1995年秋の大会 (Oct., 1995)
- [5] 神崎 寛他、「原子炉容器壁冷却系ナトリウム試験」、日本原子力学会1996年秋の大会、C16 (Sep., 1996)
- [6] H. Kamide, Y. Ieda, et al., "Core-plenum thermohydraulics under decay heat removal by natural circulation - Sodium experiments for seven-subassembly model-", Proc. of FRS '94, Obninsk, Russia (Oct., 1994)
- [7] 木村暢之、西村元彦他、「高速炉の冷却系に関する総合試験計画－炉容器内温度成層化現象に関する解析評価－」 PNC TN9410 (発行予定)

表1 試験課題の内容

項目	課題の内容
(1) 系統熱過渡試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>・原子炉容器内、IHX容器内の伝熱流動挙動 　　温度成層化現象、炉内自然循環特性、カバーガス熱伝達、ルーフスラブの熱遮蔽性能、カバーガスシール性能、など</li> <li>・炉容器、炉内構造物、配管、IHX容器・管板への熱過渡</li> <li>・管内1次、2次側斜行流のIHX伝熱流動特性</li> <li>・定格およびSGを用いた崩壊熱除去時の除熱性能、系統不安定性の有無</li> </ul>
(2) 自然循環崩壊熱除去特性試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>・定常状態において、DHX 1次側の自然循環による除熱特性および空気冷却器を含むDHX 2次系の除熱特性</li> <li>・自然循環定常状態における炉心部の逆流現象、上部プレナム内の温度成層化現象と自然循環流動への影響</li> <li>・全動力電源喪失事故等の過渡時における強制循環から自然循環への移行過程における除熱特性</li> </ul>
(3) 炉容器壁保護系性能試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>・定格および部分負荷時に低温ナトリウムの循環の阻害、異常な温度分布の発生がなく、冷却機能が十分な性能を有していることの確認</li> <li>・原子炉トリップ等の過渡時および液位変化時における冷却性能</li> <li>・炉壁冷却系出口部におけるサーマルストライピングの有無、温度変動幅、変動周期</li> <li>・炉壁冷却系ライナー部の液面変動に伴う軸方向温度分布特性</li> </ul>
(4) 蒸気発生器・水蒸気系熱流動試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>・定格、部分負荷での伝熱流動特性</li> <li>・起動、停止および事故時の熱過渡特性</li> <li>・水蒸気側流動安定性</li> <li>・SGによる崩壊熱除去特性</li> <li>・水素透過特性</li> <li>・リーク検出特性</li> <li>・球形管板の構造健全性</li> </ul>

表2 炉容器及び1次系モデル概念の総合比較

項目	Case A 3ループ	Case B 2ループモデル	Case C 仕切板付きモデル	Case D 偏心1ループ
試験課題の充足性	・小規模ではあるがマルチループであり試験性能上問題ない。	・1/3スケール以上2ループであり試験性能上問題ない。(1次系)2次系と1次系のアンバランスは少ない。(SGは高さ実寸)	・1/3スケール以上であり、試験性能上問題ない。系統/炉容器のバランスに優れている。	・1/3スケール以上であり試験性能上問題ない。
	・1/4スケールではIHX特性採取が困難。	・1/3スケールではIHX特性採取が困難。(34Mtとすることにより採取可能)	・10層以上の伝熱管であり、IHX試験性能上問題ない。	・10層以上の伝熱管であり、IHX試験性能上問題ない。
	・1/4スケルと小規模ではあるが試験性能上問題ない。	・実機にない構造が存在せず、試験性能上問題ない。	・仕切板の境界条件への影響	・アレム形状が異り、流況模擬できず、実証性が乏しい。
	・CaseBと同一。	・実機形状模擬が可能であり、試験性能上問題ない。	・総合性能の確認が困難。 ・試験のための設備の規模が大きい。仕切壁の影響が考えられる。	・壁冷戻り部の模擬ができず、試験性能上問題がある可能性がある。
	・炉心模擬性は若干劣るが大きな問題ではない。 ・3系統非対称試験が可能。	・試験性能上問題ない。 ・非対称試験が可能。	・グローバルな試験性能上は問題ないが、仕切板により集合体最高温度評価の観点からは実証性が低下する。	・炉心アレム配置及びアレム形状が異り、流況模擬できないことから実証性が乏しい。
	・2次系を1器のSGに集約することにより試験性能上問題ない。	・2次系を1器のSGに集約することにより試験性能上問題ない。	・必要交換熱量が確保され試験性能上問題ない。	・必要交換熱量が確保され試験性能上問題ない。
	・CaseBと同一。	・仕切板がない対称配置であり、装置特有の変形は生じない。	・炉容器の周方向温度分布による装置特有の変形が生じるため、試験上問題がある。	・偏心体系であり、試験装置の非対称性により装置固有の変形が生じる可能性がある。
	○	○	△	×
構造健全性見通し	・特に問題となる構造部位はない。	・特に問題となる構造部位はない。	・仕切板結合部において高応力が発生、構造に工夫が必要。	・特に問題となる構造部位はない。
炉心ヒータメンテナンス性	・UISを引き抜くことにより特に問題なし。	・UISを引き抜くことにより特に問題なし。	・UISを引き抜くことにより特に問題なし。	・UISを引き抜くことにより特に問題なし。
原子炉容器の改造に対する柔軟性	・Case Cより柔軟性は高い。	・Case Cより柔軟性は高い。	・仕切板の取外し分だけ柔軟性が低い。 ・大規模炉容器が活用できる。	・偏心体系であり、改造しても利用範囲が制限される。
経済性	△	△ (1/2.5スケール)、○ (1/3)	○	○
課題の難易度	・低コスト化(模擬性を維持しながらの低コスト化は困難)	・IHX特性評価法の確立 (1/3スケール)	・構造健全性に対する裕度の増大。 ・炉容器内熱流動及び壁冷試験の模擬性向上。	・実証炉特性の実証性の証明が困難。 ・構造変更時における模擬性



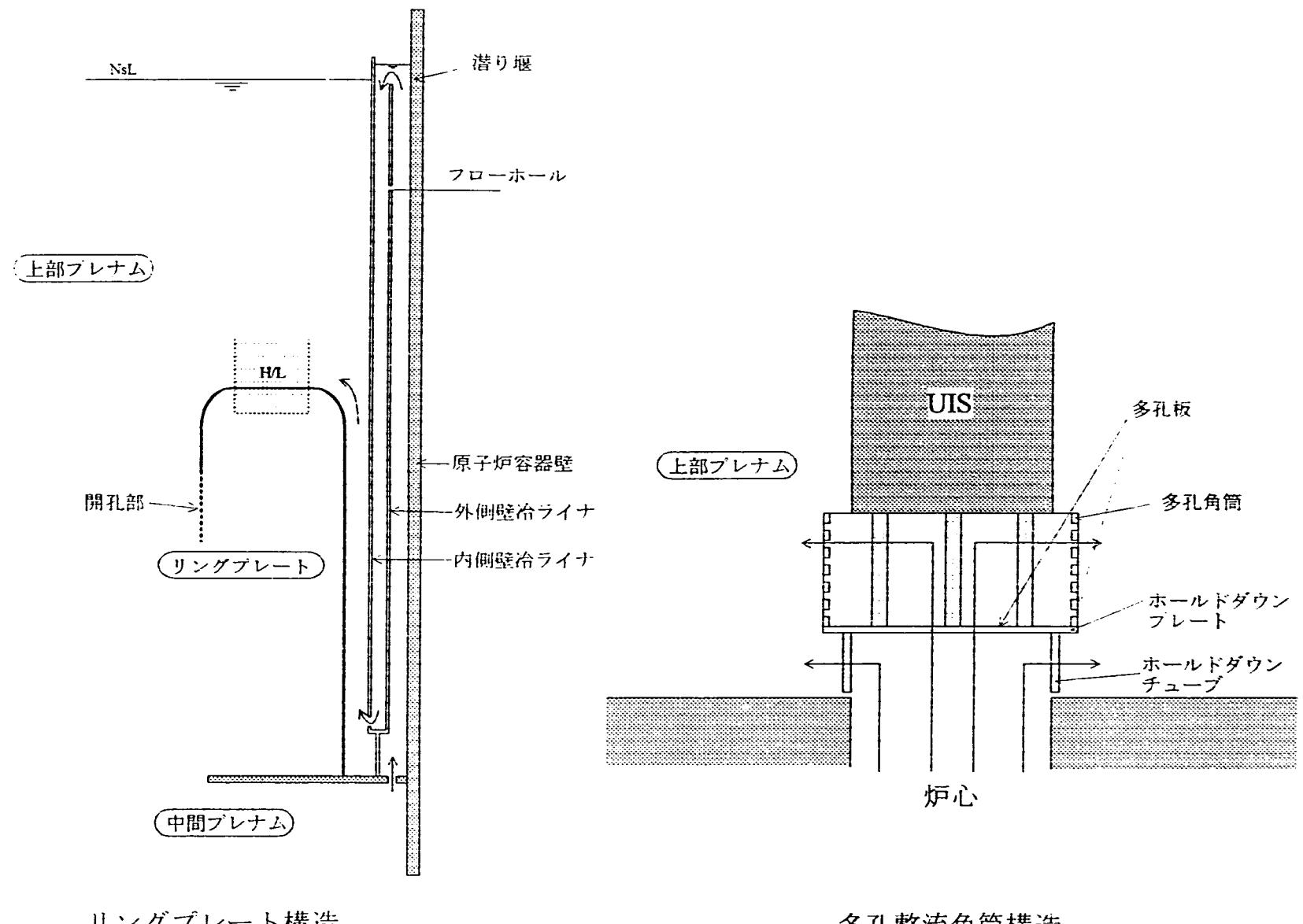


図2 炉壁冷却系およびガス巻き込み抑制構造

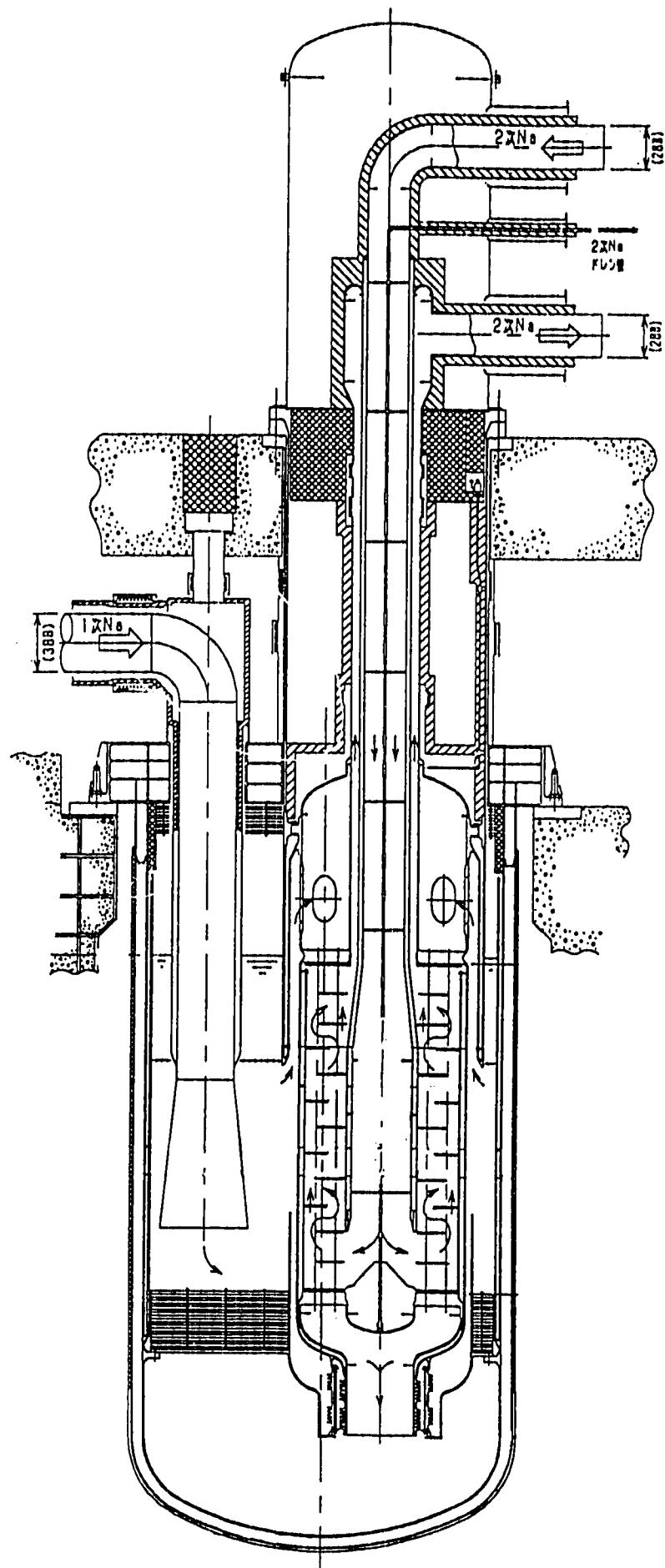


図3 実証炉におけるIHX構造概念

<p><b>ケースA (3ループモデル) 1/4スケール</b></p>	<p>上部フレーム: D=2.5m H=1.5m IHX: 3基 17MW DRACS: 3基 0.4MW ポンプ: 3基 306t/h 1次Na容量: 40ton</p>	<p>炉容器内及び系統の形状相似を重視し、3ループ構成とした。 解析コードによる外挿性を考慮し1/4スケールとした。IHXの2次側で1ループに集約し1器のSGと接続することによりSG試験を可能とした。</p>
<p><b>ケースB (2ループモデル) 1/3スケール</b></p>	<p>上部フレーム: D=2.7m H=2m IHX: 2基 34MW DRACS: 2基 0.9MW ポンプ: 2基 620t/h 1次Na容量: 61ton</p>	<p>Case Aを合理化、熱容量、流速のバランスをとるため、炉容器の水平面の断面積を2/3セクタ-(2ループ分)と等しくし、試験モデル特有の構造を避けることを意図。 炉容器内に仕切板を設けず形状模擬のため円筒容器に2ループを配置。 1/3スケールとし、IHXの2次側で1ループに集約し1器のSG(50MW)と接続することによりSG試験可能。 DRACS、ループの非対称事象を試験対象に含めることができる。</p>
<p><b>ケースC (1/3セクターモデル)</b></p>	<p>上部フレーム: D=4m H=2.5m IHX: 50MW DRACS: 1.5MW ポンプ: 918t/h 1次Na容量: 94ton</p>	<p>ループ側と炉容器側の熱容量、流速のバランス及び形状の相似を、炉容器を1/3セクタで仕切ることにより確保。 壁冷試験以外は1/3セクタ部で実施、壁冷試験は全周で実施。 温度成層化、系統熱過渡の模擬及びSG、IHXの特性模擬に必要な最小出力50MW程度にモデルの定格出力を合わせることから1/2.5スケールとした。</p>
<p><b>ケースD (偏心1ループモデル)</b></p>	<p>上部フレーム: D=2.3m H=2.5m IHX: 50MW DRACS: 1.5MW ポンプ: 918t/h 1次Na容量: 52ton</p>	<p>経済性を重視、解析コードによる外挿を期待し、1ループのみを模擬した。 ループと炉容器の熱容量のバランスをとるため、炉容器について水平面の断面積を1/3セクタと等しくし(1ループ分)、炉心と配管は円筒容器内に偏心させて配置。 スケールは1/2.5とした。</p>

共通仕様: SG特性模擬に必要な最小限の出力50MWを定格出力 (各Case共通とする)

図4 炉容器および1次系モデルの候補概念

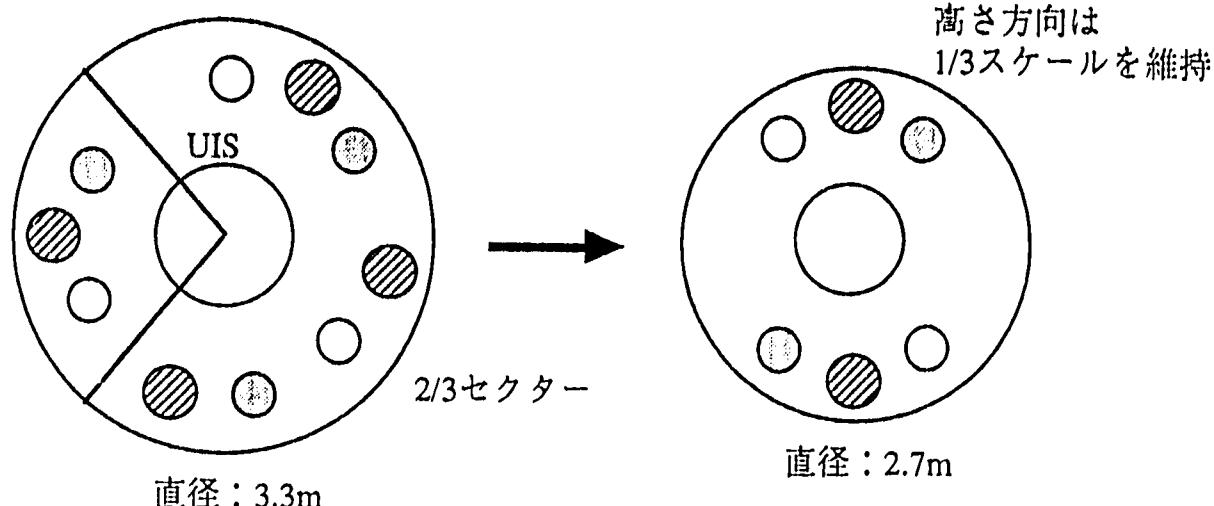


図5 ケースBのモデル概念

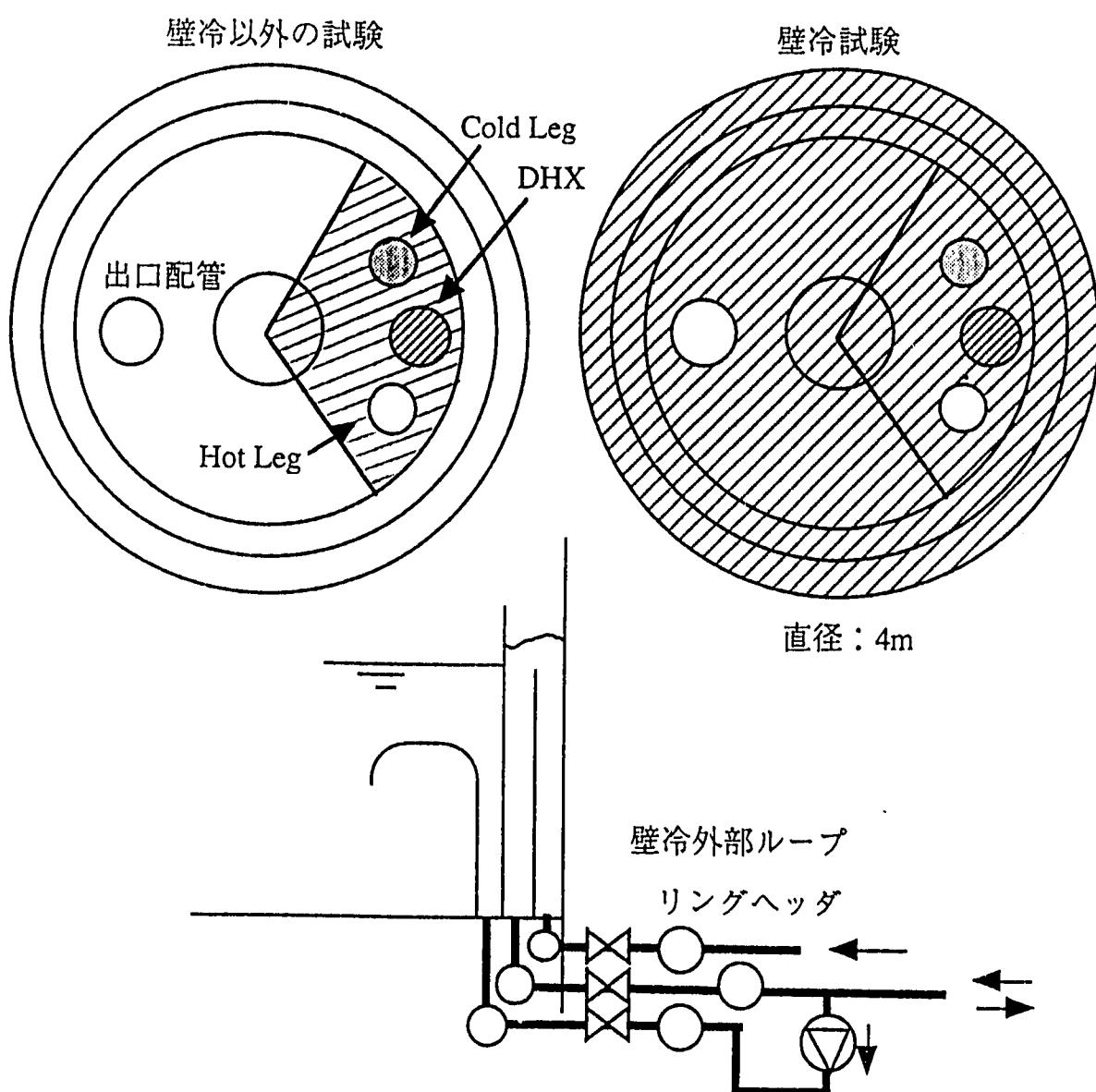
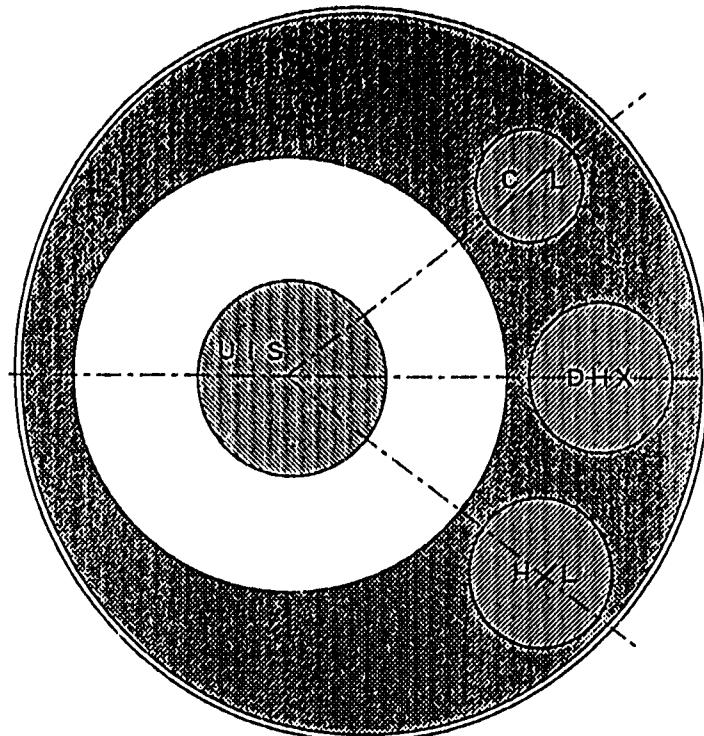


図6 ケースCのモデル概念



No	項目	仕様
1	スケール	1/2.5
2	1次系4-7"数	1
3	容器径	~実機×1/2.5×√(1/3) (Φ 2,314m)
4	アーチ高さ	実機×1/2.5
5	H/L, C/L, DHX径	同上
6	H/L, C/L, DHX配図	同上
7	リングアーチ高さ	同上
8	リングアーチ内径	~実機×1/2.5×√(1/3)

\*断面積が14-7"分となるように補正

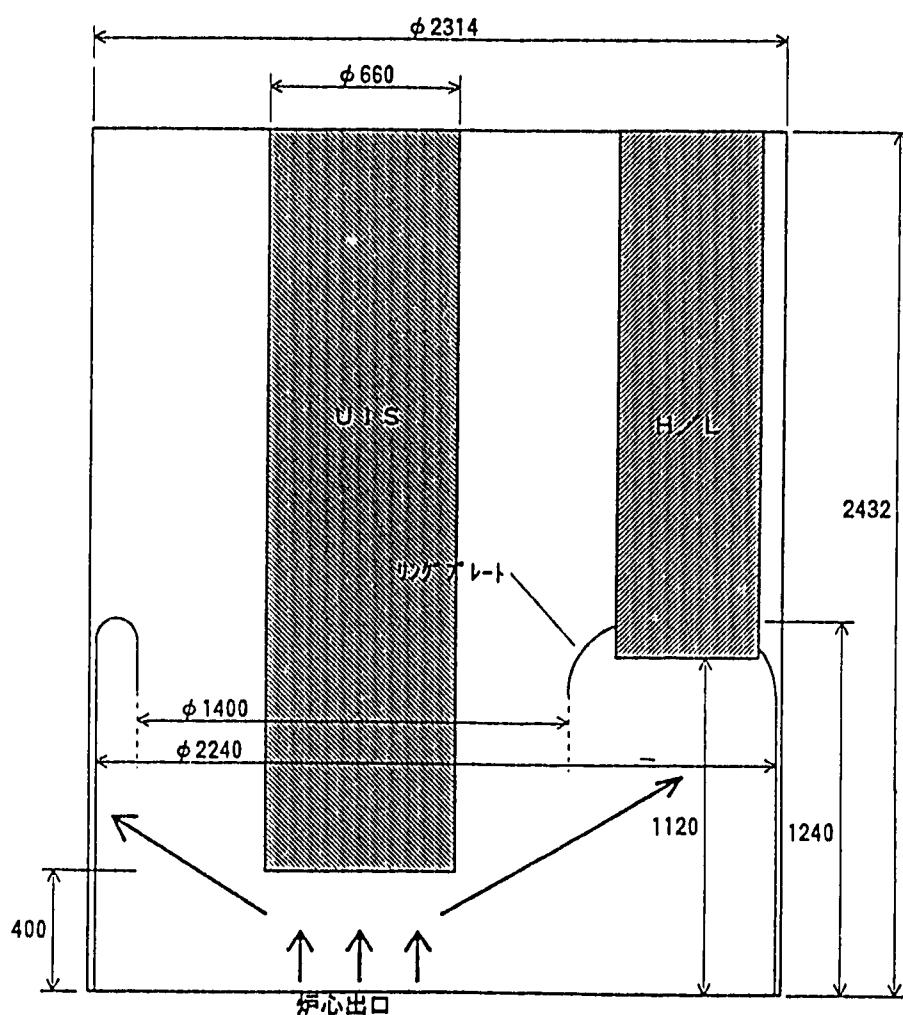
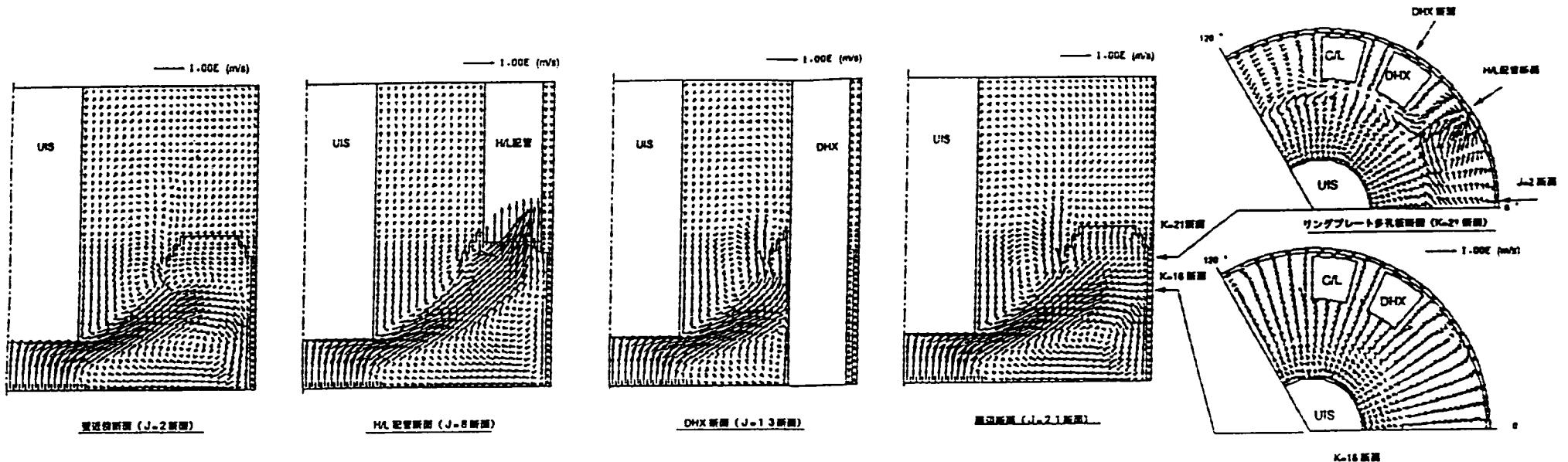
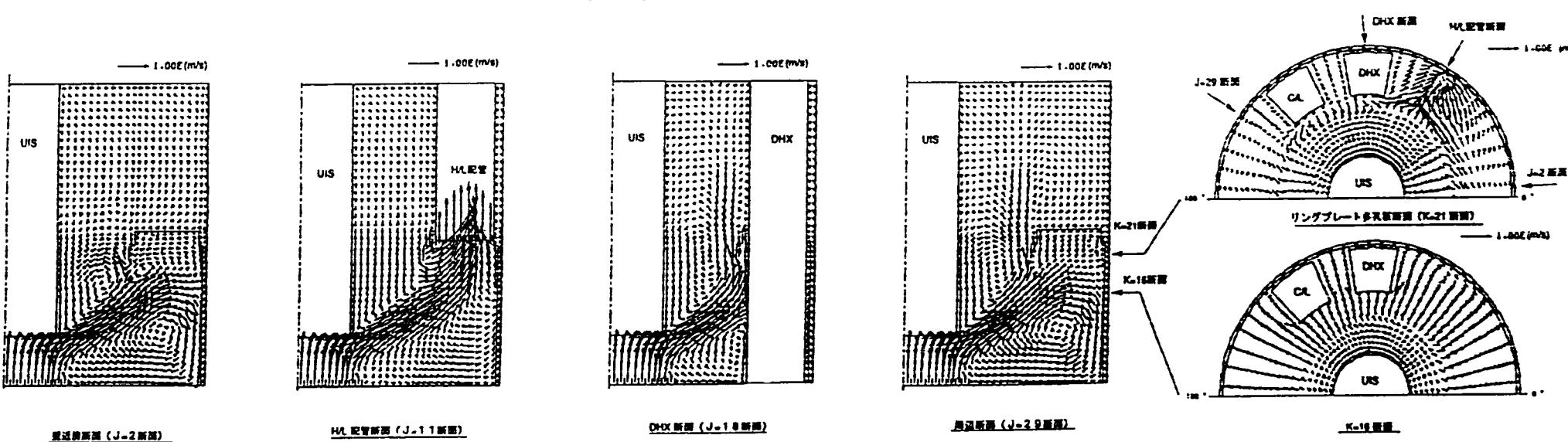


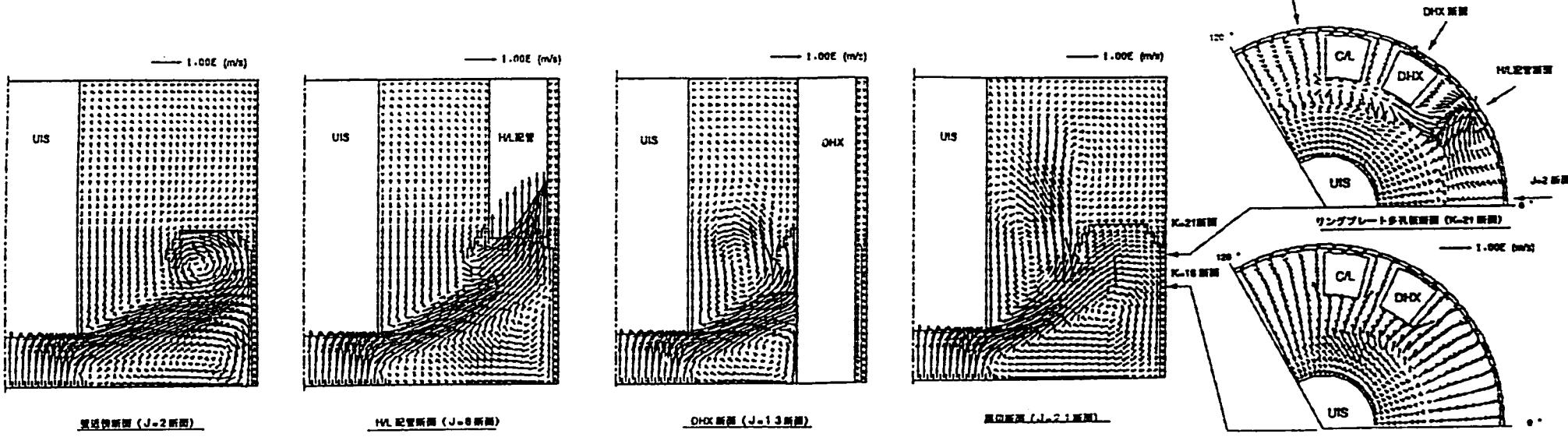
図7 ケースDのモデル概念



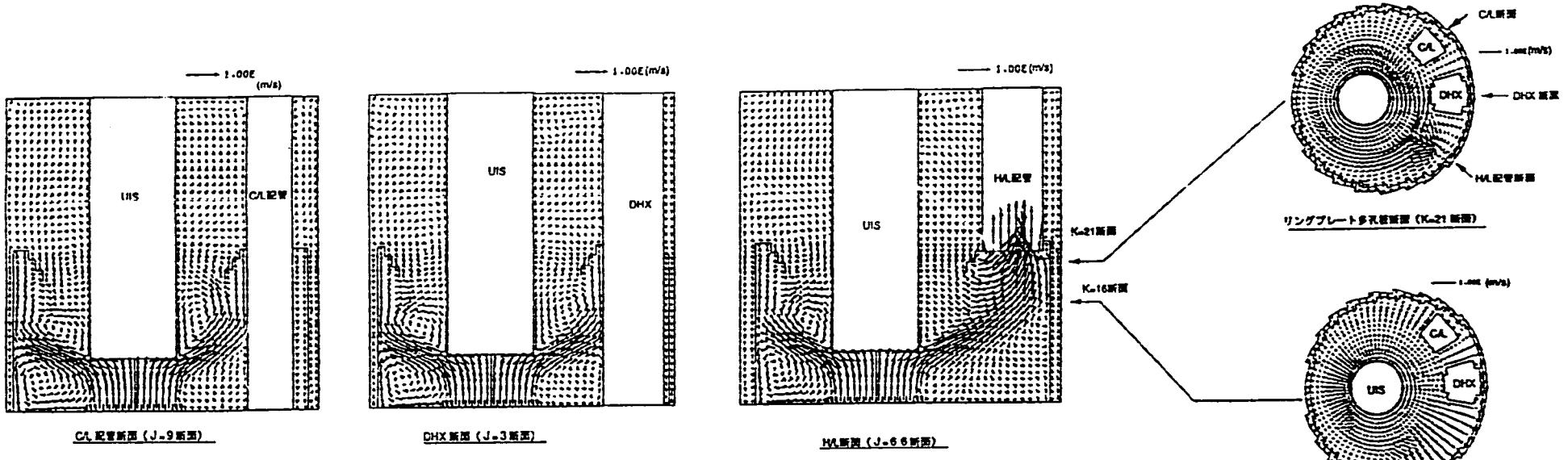
1/3セクター周期境界条件モデル（全周相当）



ケースB（2ループモデル）



ケースC（1/3セクターモデル）



ケースD（偏心1ループモデル）

図8 定格運転状態での炉容器上部プレナム内流動場の比較

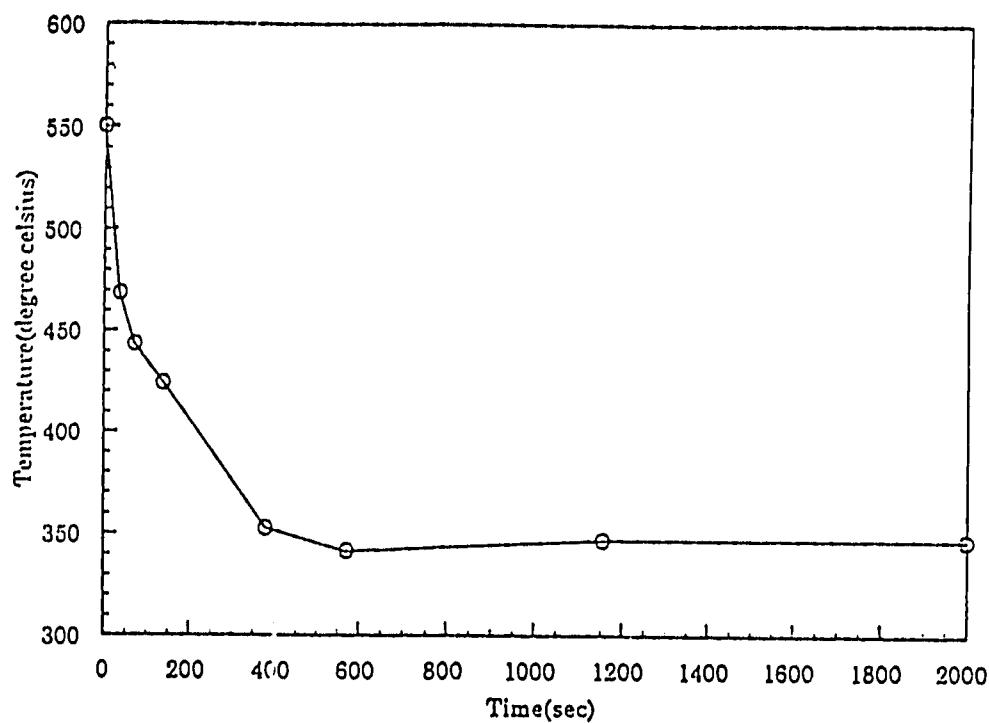
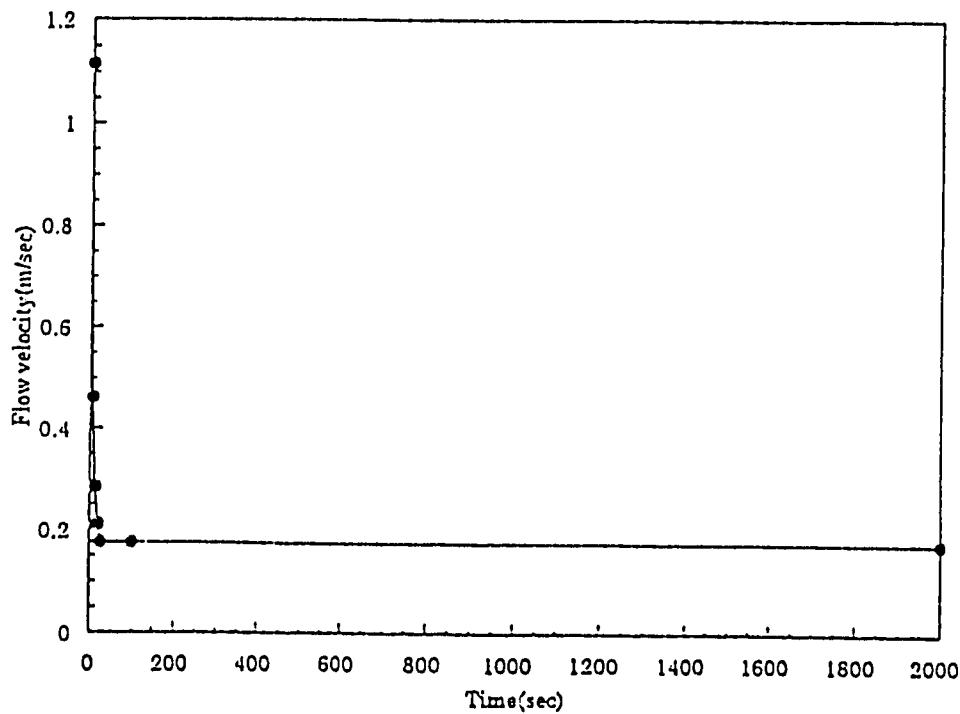
入口温度過渡変化条件入口流速過渡変化条件

図9 手動トリップ時炉心出口温度および流量の過渡変化カーブ

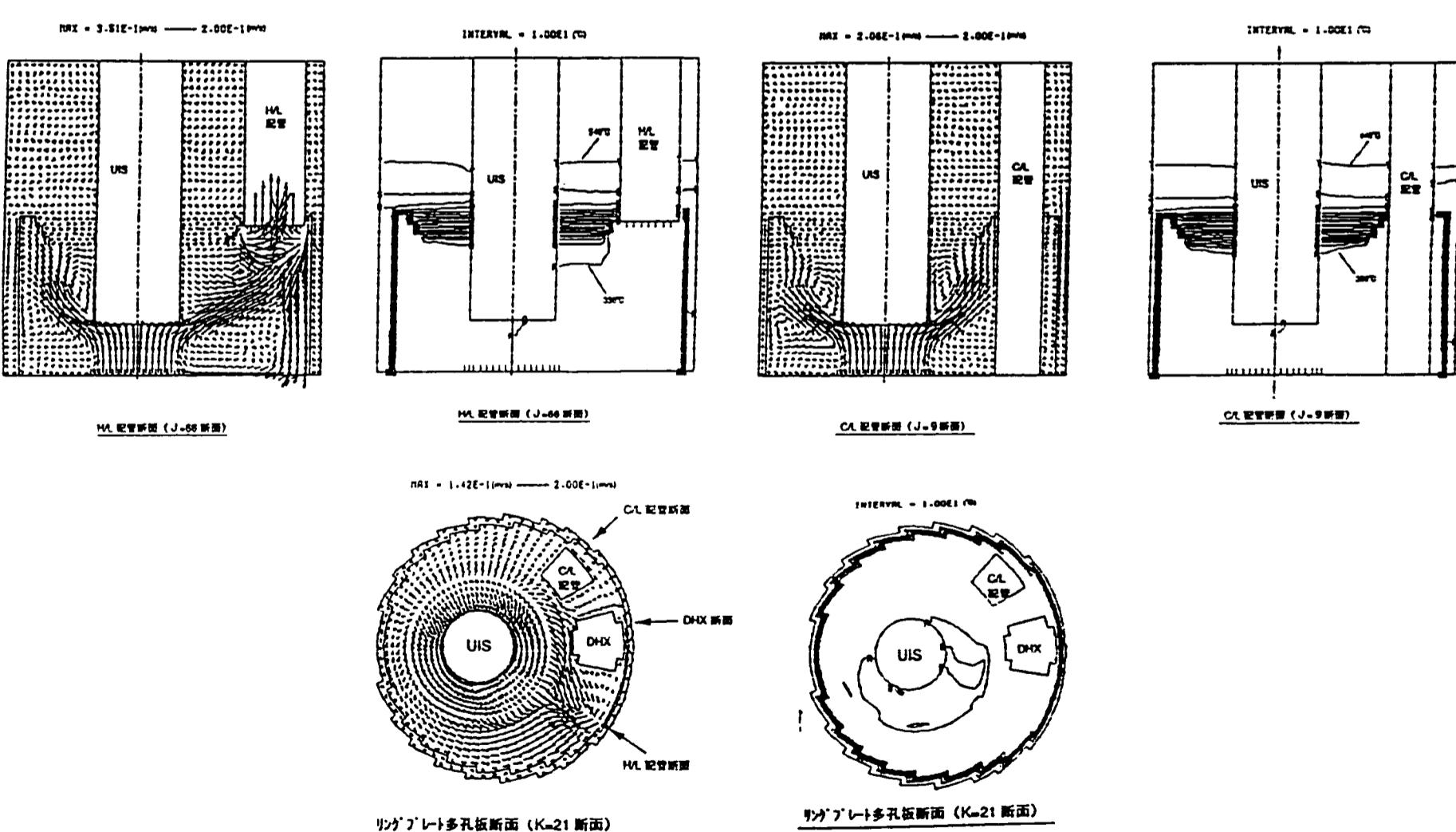
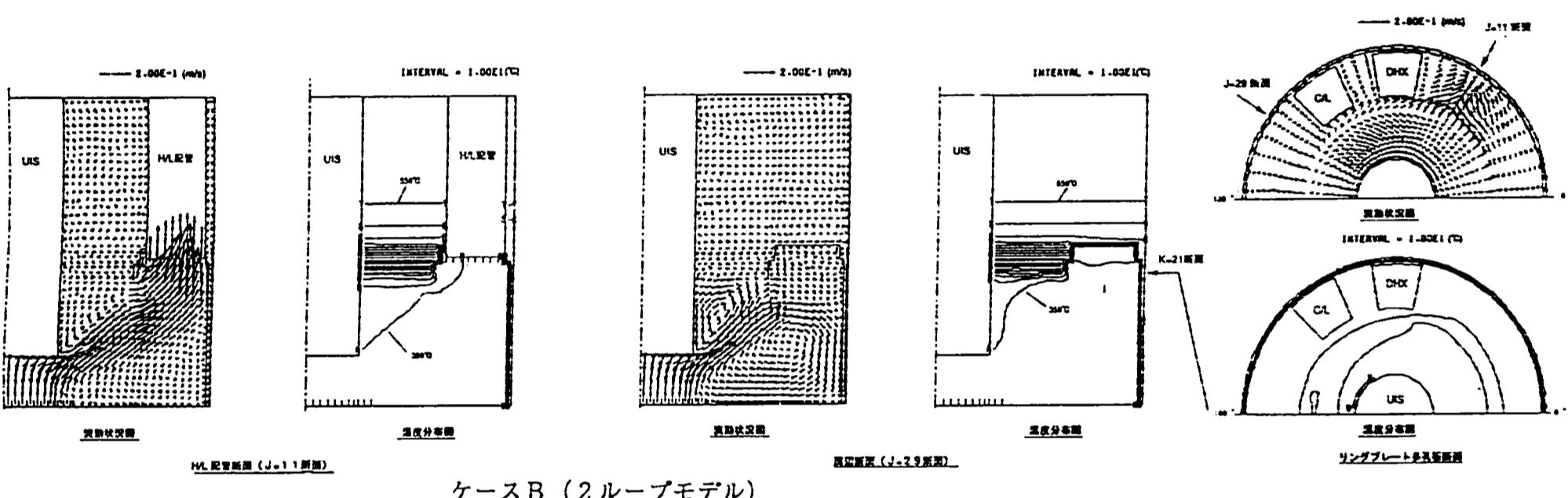
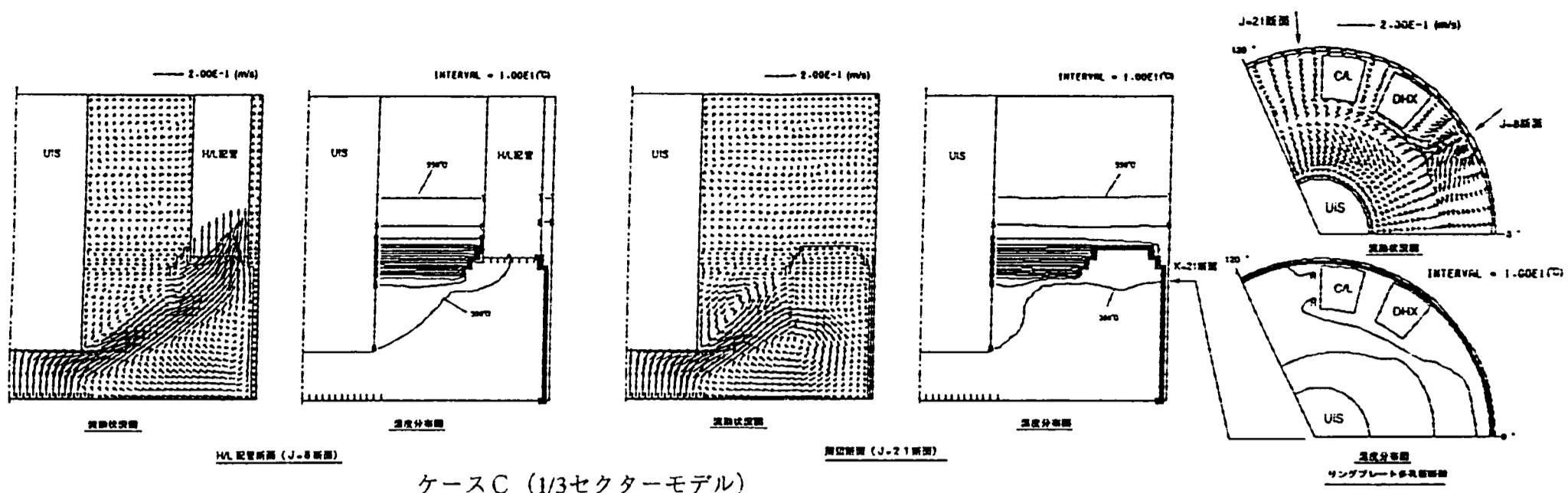
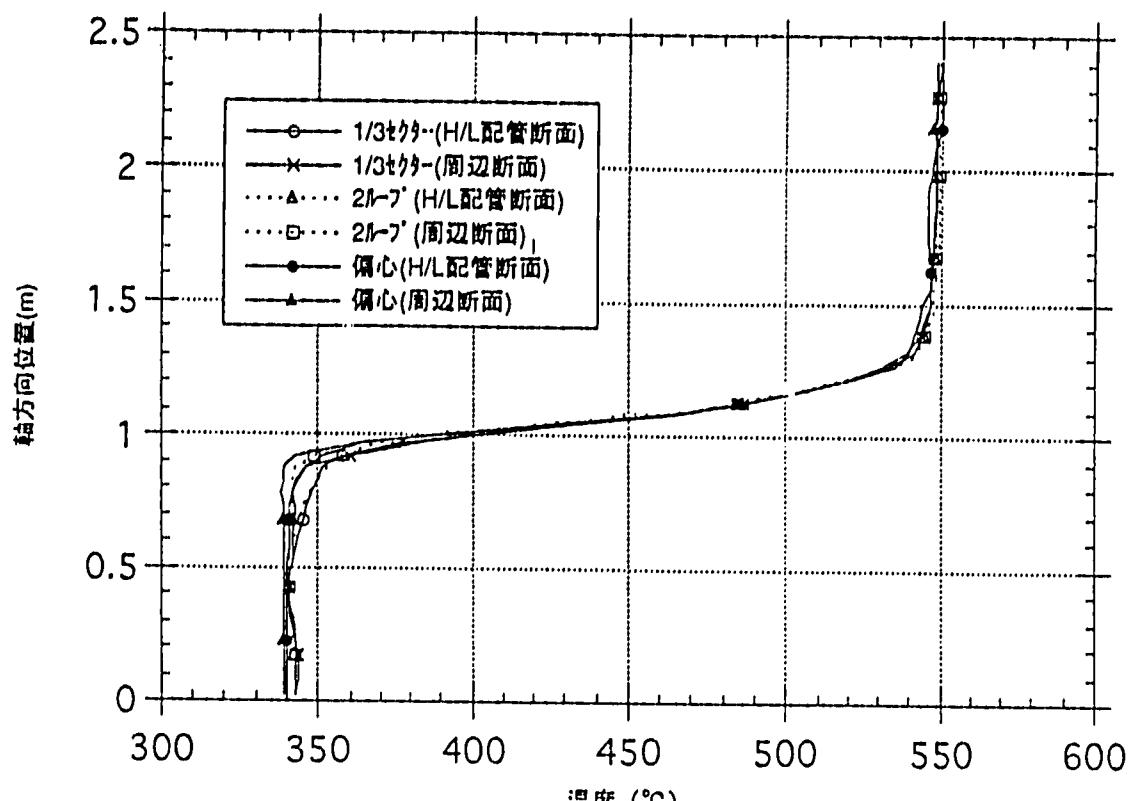


図10 手動トリップ時容器上部プレナム内温度成層化現象の比較



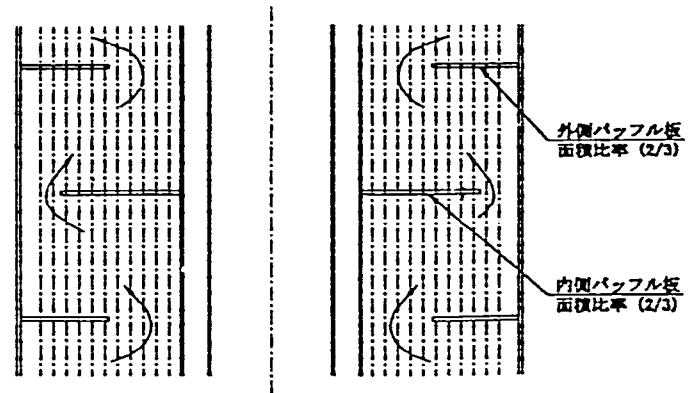
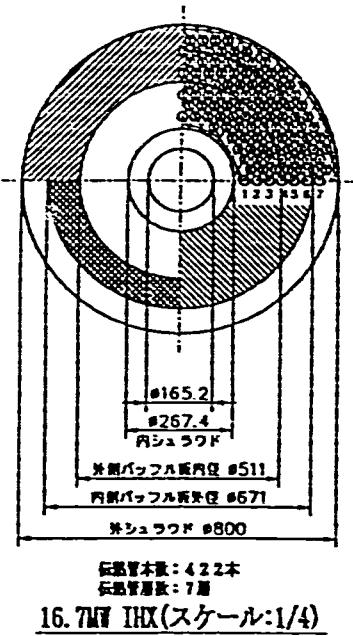
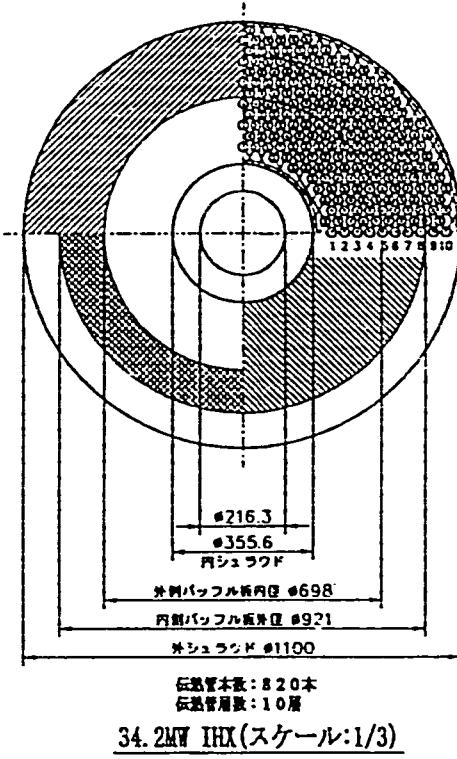
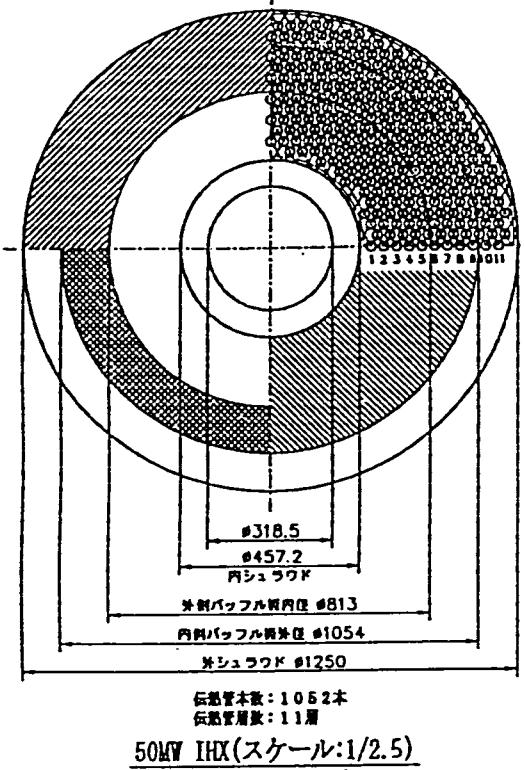
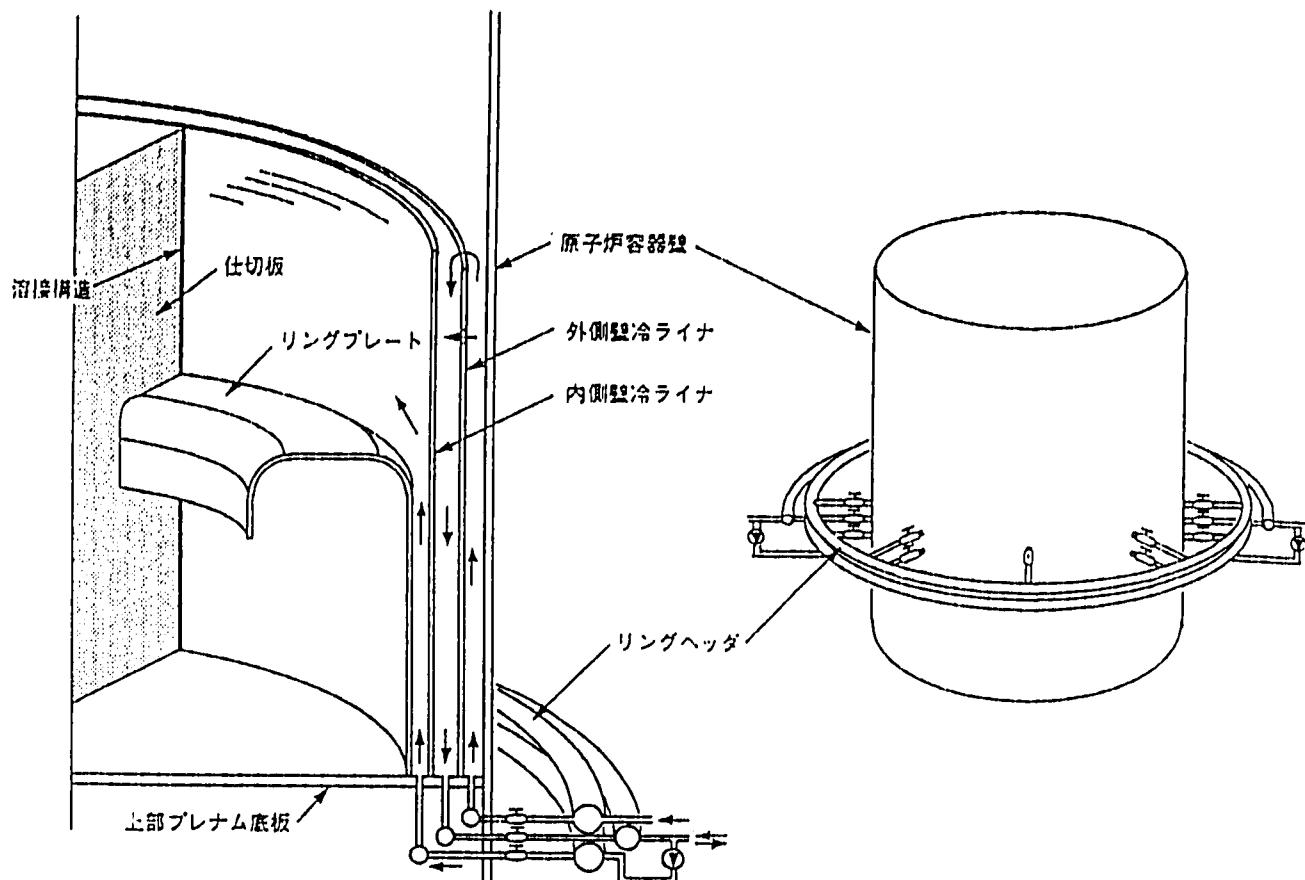
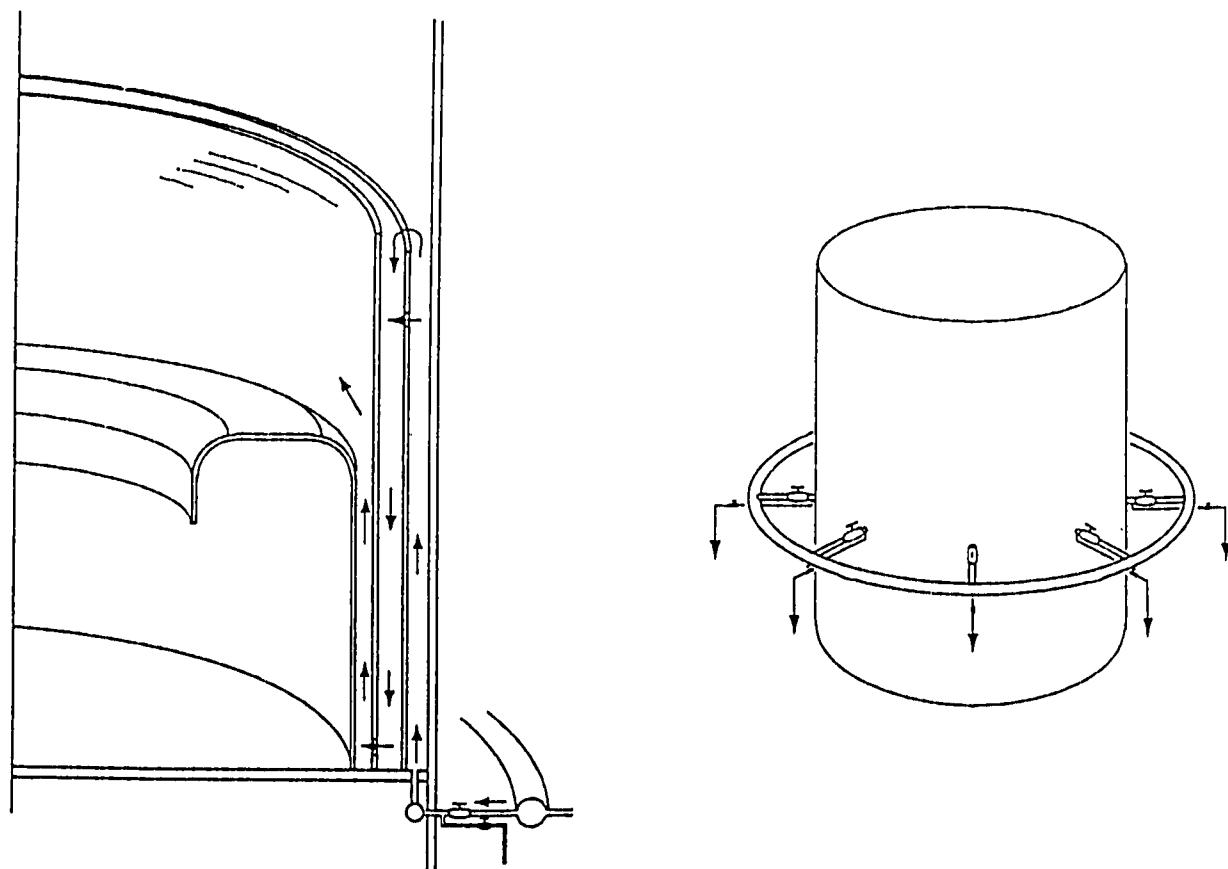


図12 各IHXモデル伝熱部におけるバッフル板と伝熱管列数の関係



ケースC (1/3セクターモデル)



ケースB (2ループモデル)

図13 炉壁冷却系外部ループ構成のケースB、C間の比較

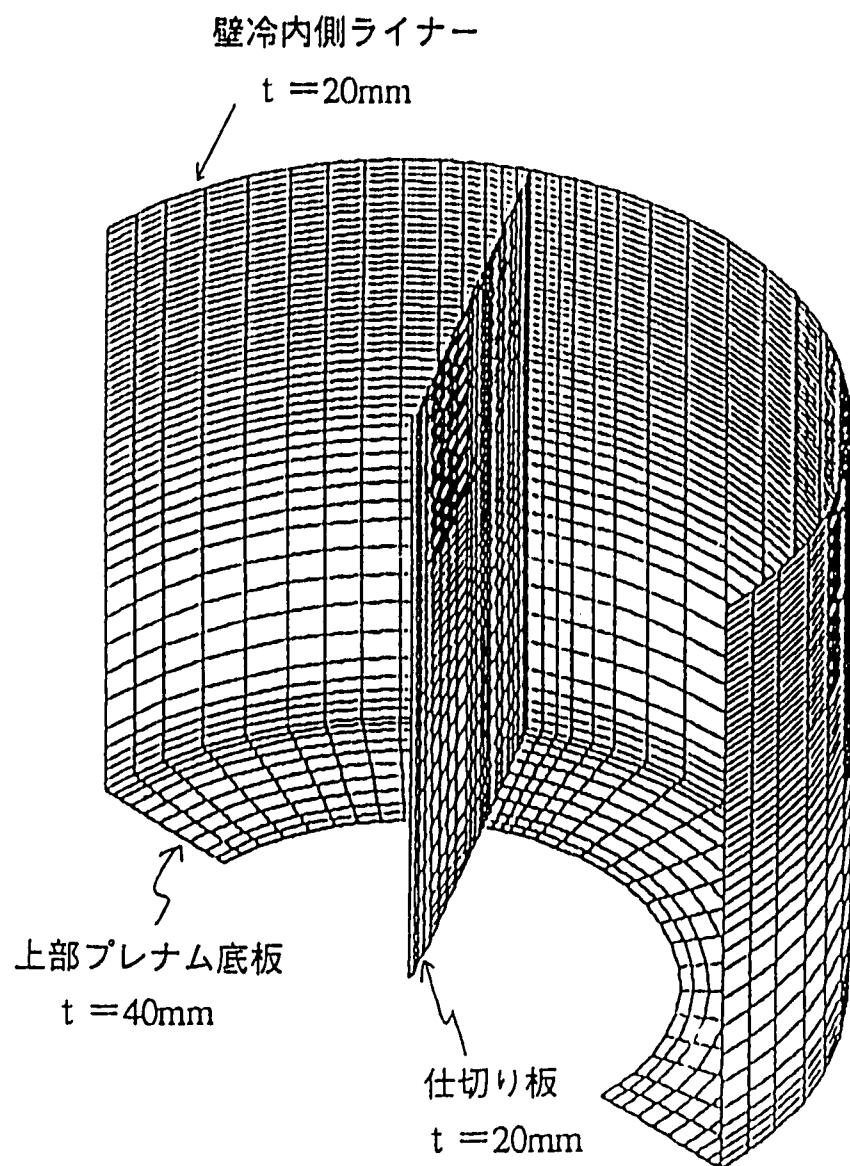


図14 ケースC炉容器モデル構造健全性評価にかかるFEM解析モデル

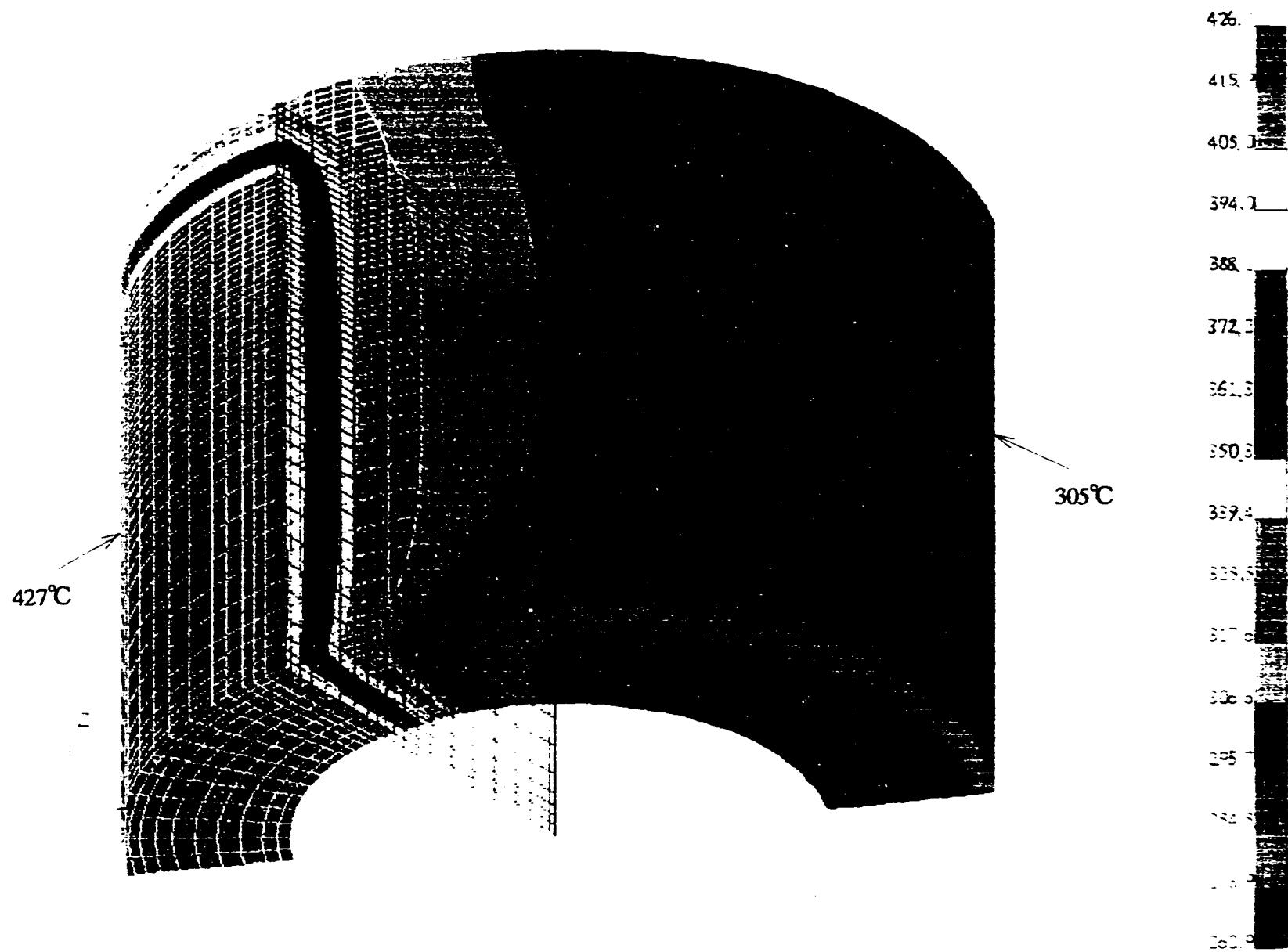


図15 起動試験時の仕切り板まわりの温度分布

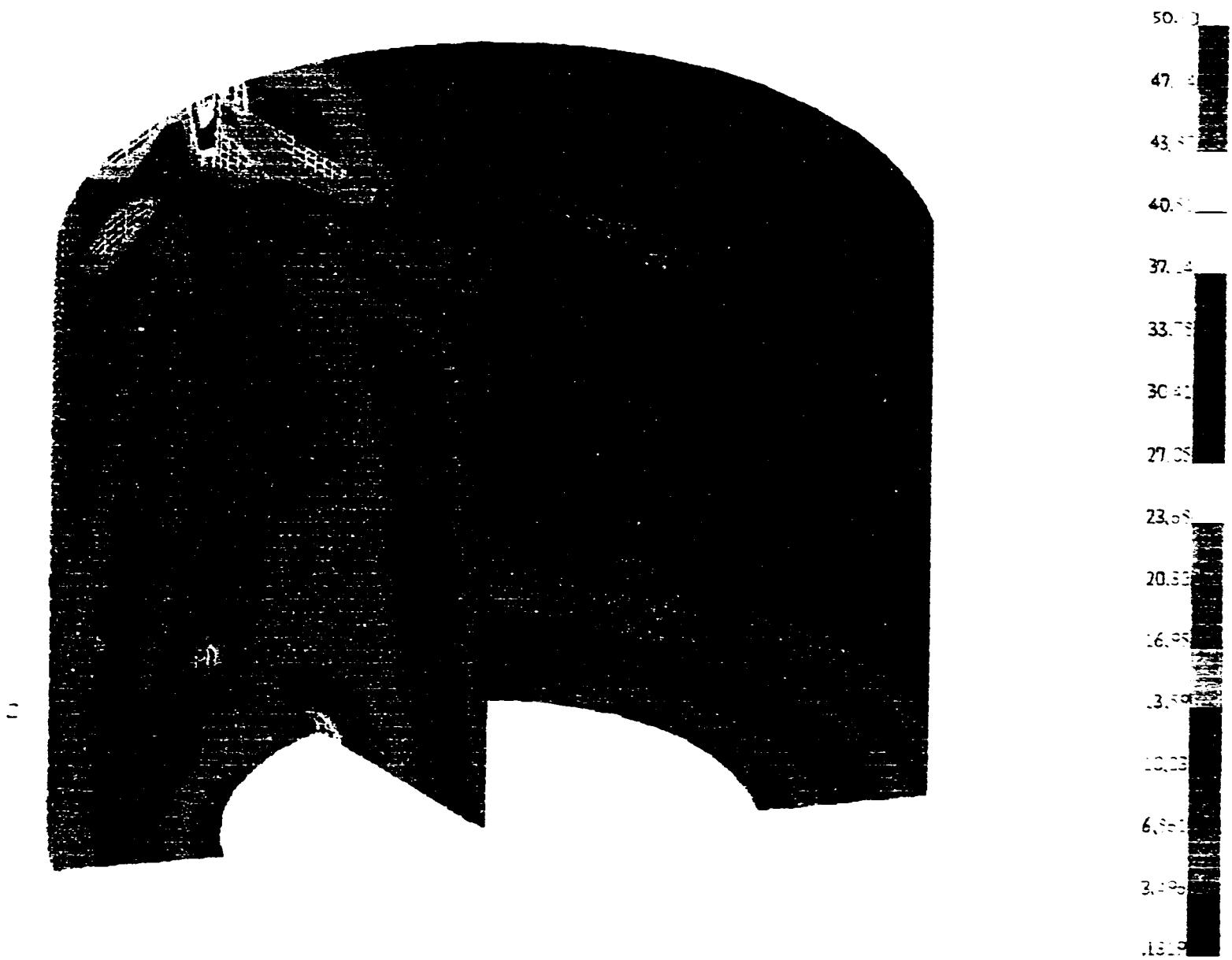


図16 起動試験時の仕切り板まわりの弾性応力分布（トレスカ応力一外面）

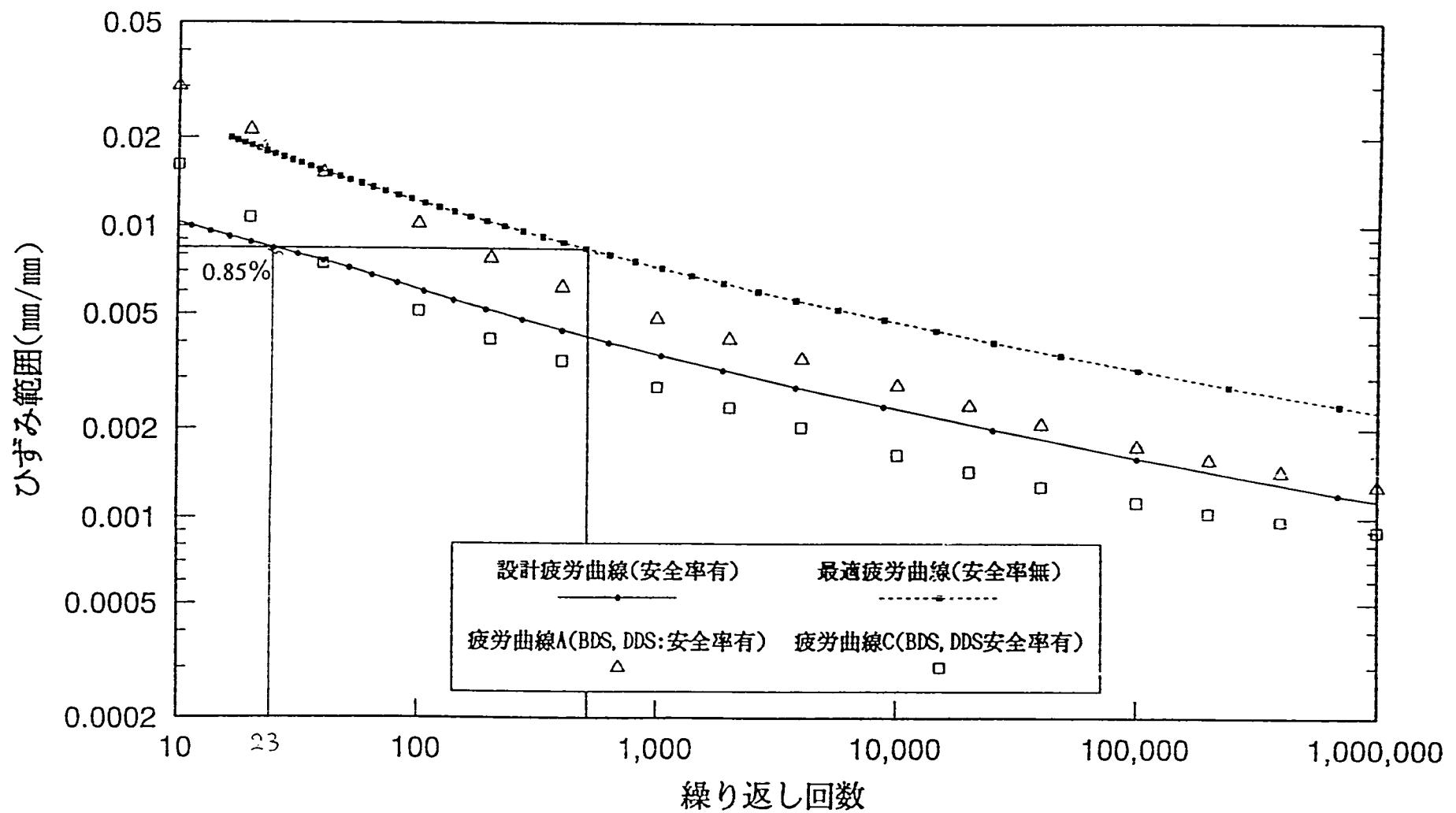


図17 SUS316FR鋼の低歪み速度での疲労曲線 ( $\dot{\varepsilon} = 1.0 \times 10^{-8} \text{ sec}$ )

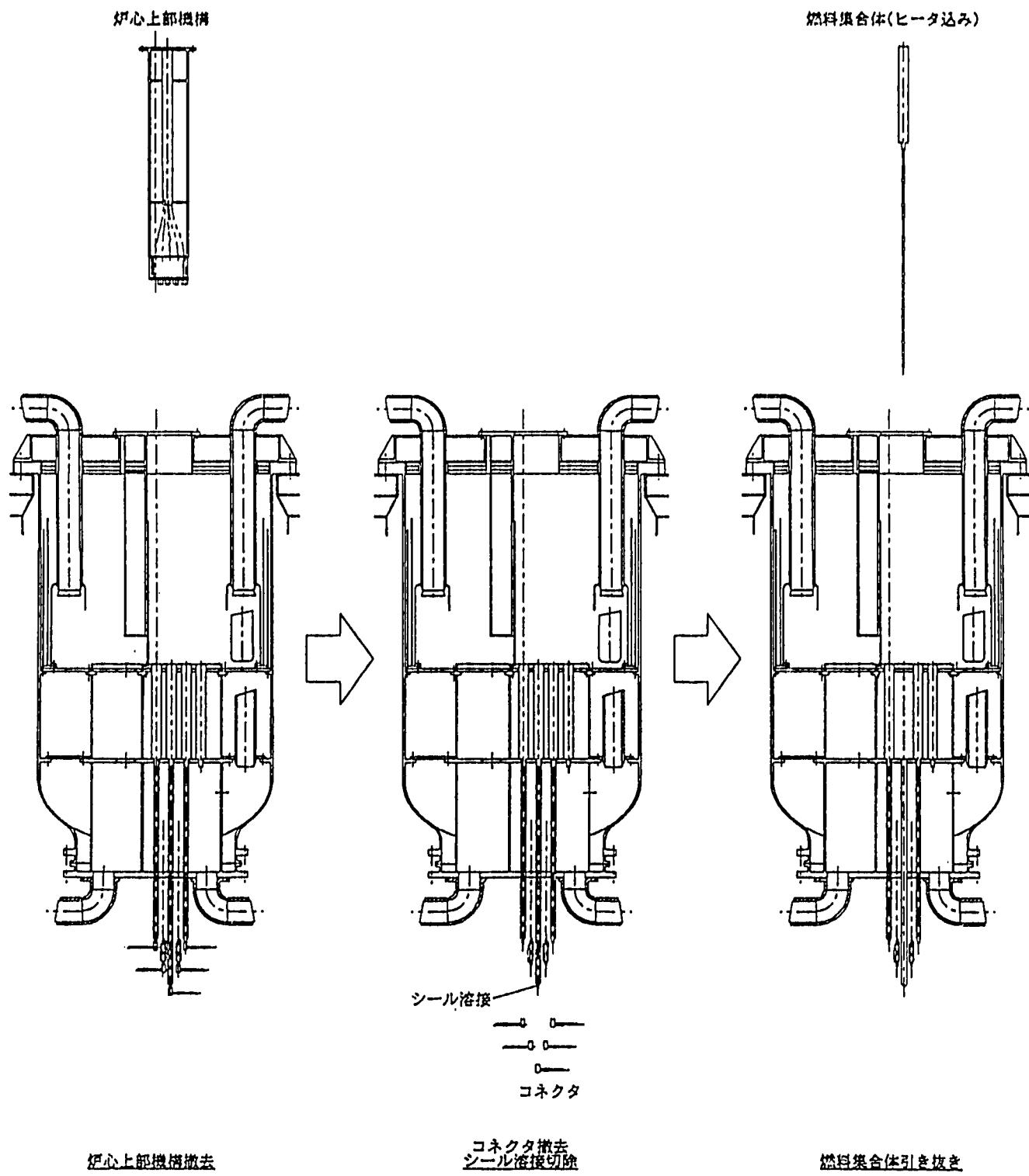


図18 炉心部電気ヒーター内蔵集合体のメンテナンス方法

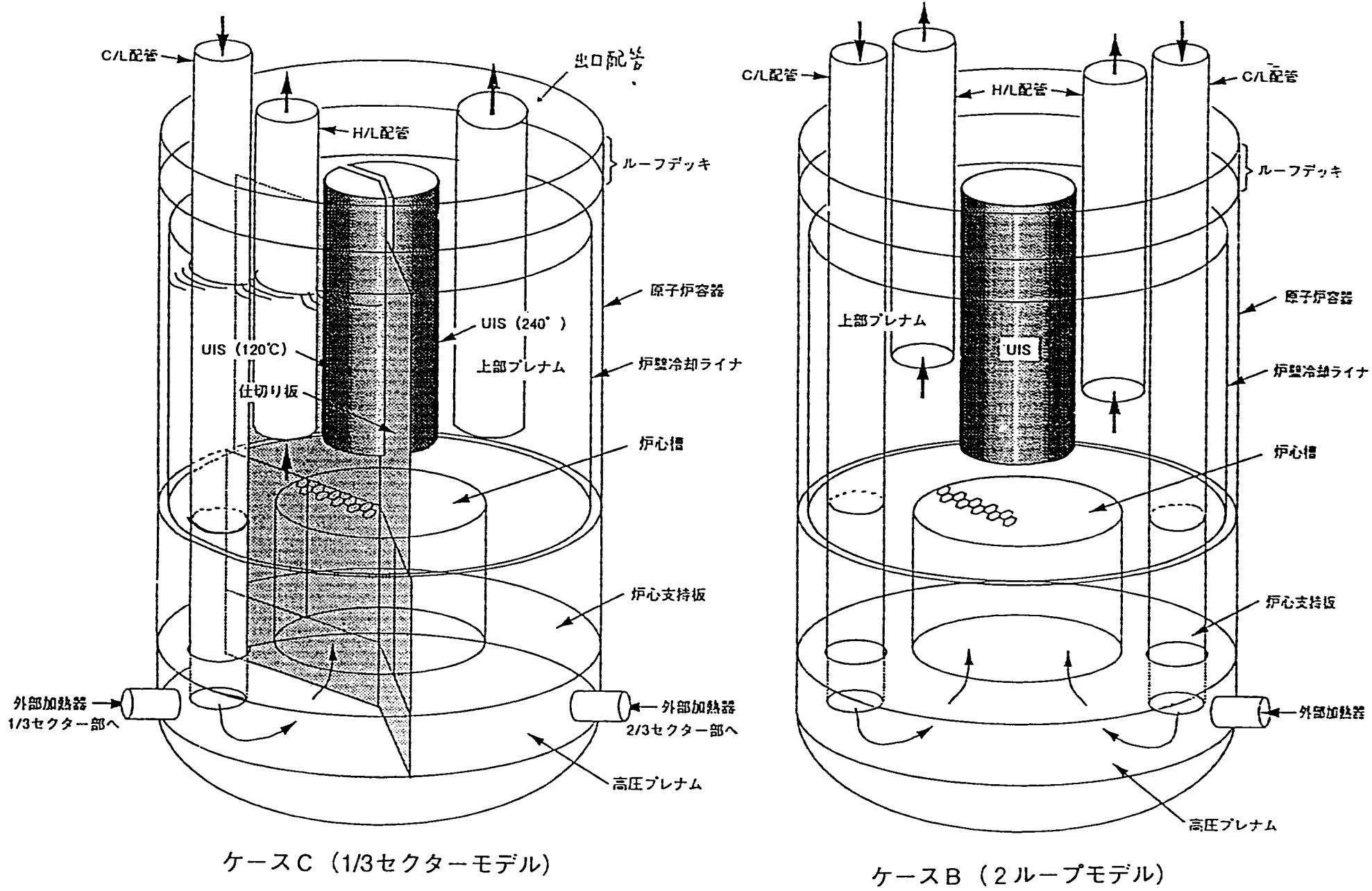


図19 ケースBおよびCの炉容器構造概念

## 構造上の模擬性

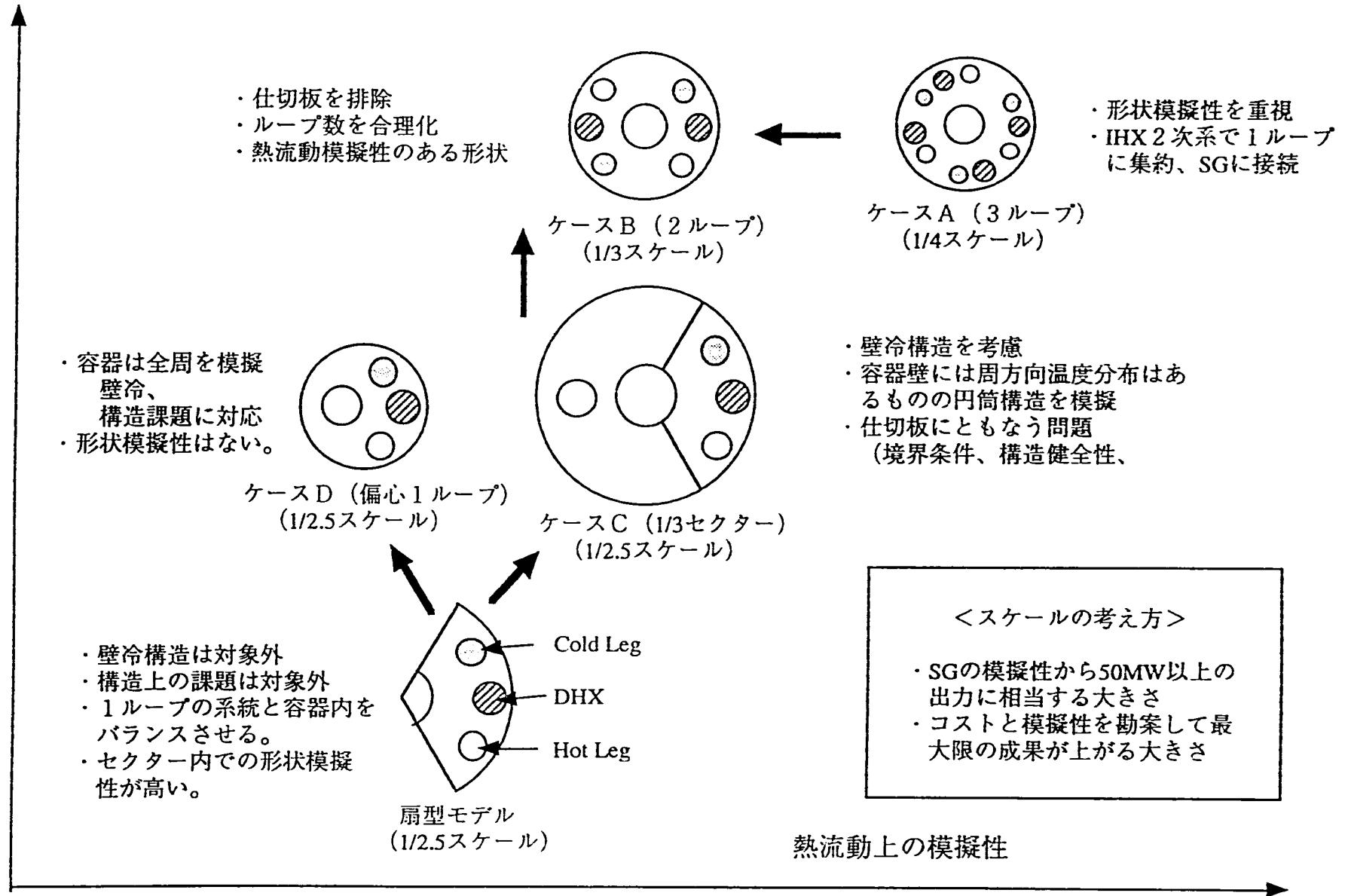


図20 各試験モデル概念の構造及び熱流動課題に対する模擬性

