

## 表1-2-5 二重伝熱管蒸気発生器の製作性

### [実績]

- ・ 約2mの長さの12Cr鋼密着二重伝熱管を試作
- ・ 旧動燃における1MWt二重伝熱管蒸気発生器小型試験体等の製作時に全長20m程度の9Cr鋼二重伝熱管を製作した実績がある。
- ・ 伝熱管本数7,100本/基については、APWRの5,830本/基という実績があり、AP-1000では10,000本/基としていることから実現可能と考える。

### [課題]

- ・ 製作性については、以下の課題が残されており、製作手順を含めた検討を開始した。
  - 二重伝熱管: 所定の面圧及びギャップ幅を有する35m級管の製作
  - 球形管板: 高クロム鋼厚肉構造材の熱処理、及び3次元リガメント加工性（管台の削りだしと管板孔開け加工）
  - 胴ベローズ: 高クロム鋼による削り出し製作性
  - 管・管板溶接継手: 管台と二重伝熱管端部の溶接技術、及び高クロム鋼二重伝熱管の拡管技術



### (3) 高速増殖炉の技術開発課題へのコメント

#### ① 蒸気発生器

##### i. 革新的な技術としての二重伝熱管の採用

原子炉からの熱はナトリウムに伝えられ、蒸気発生器の中の伝熱管を介して、発電機を回す蒸気に伝えられる。この伝熱管の内側に水が外側にナトリウムが流れる設計となっているが、水とナトリウムが直接接触することは安全性及び信頼性確保の観点から重要な問題である。この問題への対応として、「FS フェーズⅡ報告書」では、伝熱管を二重化した蒸気発生器の開発、導入が提案されている。

国内外を含め、これまで運転あるいは計画されているナトリウム冷却高速増殖炉の蒸気発生器のほとんどが単管の伝熱管を採用している。また、二重管蒸気発生器の製造コストは、単管蒸気発生器に比して高価になると見込まれる。

安全性及び信頼性向上の重要性、さらにユーザーの意向などを考慮し、二重伝熱管蒸気発生器を革新的な技術として技術開発課題に取り上げることは妥当と考える。なお、既に二重伝熱管を試作し、その製作可能性が示されているが、蒸気発生器では数多くの伝熱管が用いられることから、製作にあたってのバラツキに留意する必要があると考える（表1-2-5参照）。

##### ii. 蒸気発生器の大型化と代替技術

「FS フェーズⅡ報告書」では、2ループ化（原子炉から熱を取り出す流れを2系統とすること）が提案されている。このため、1ループに1つ設置される蒸気発生器に要求される熱交換量が大きくなり、蒸気発生器伝熱管の表面積を大きくする必要があるとしている。

これに対応して、二重管蒸気発生器では、伝熱管が直管方式で全長約35mになるとしている。また、二重管蒸気発生器に対する代替技術として、高速増殖原型炉「もんじゅ」で利用実績があるヘリカル型単

図1-2-22 ヘリカルコイル単管型との信頼性比較

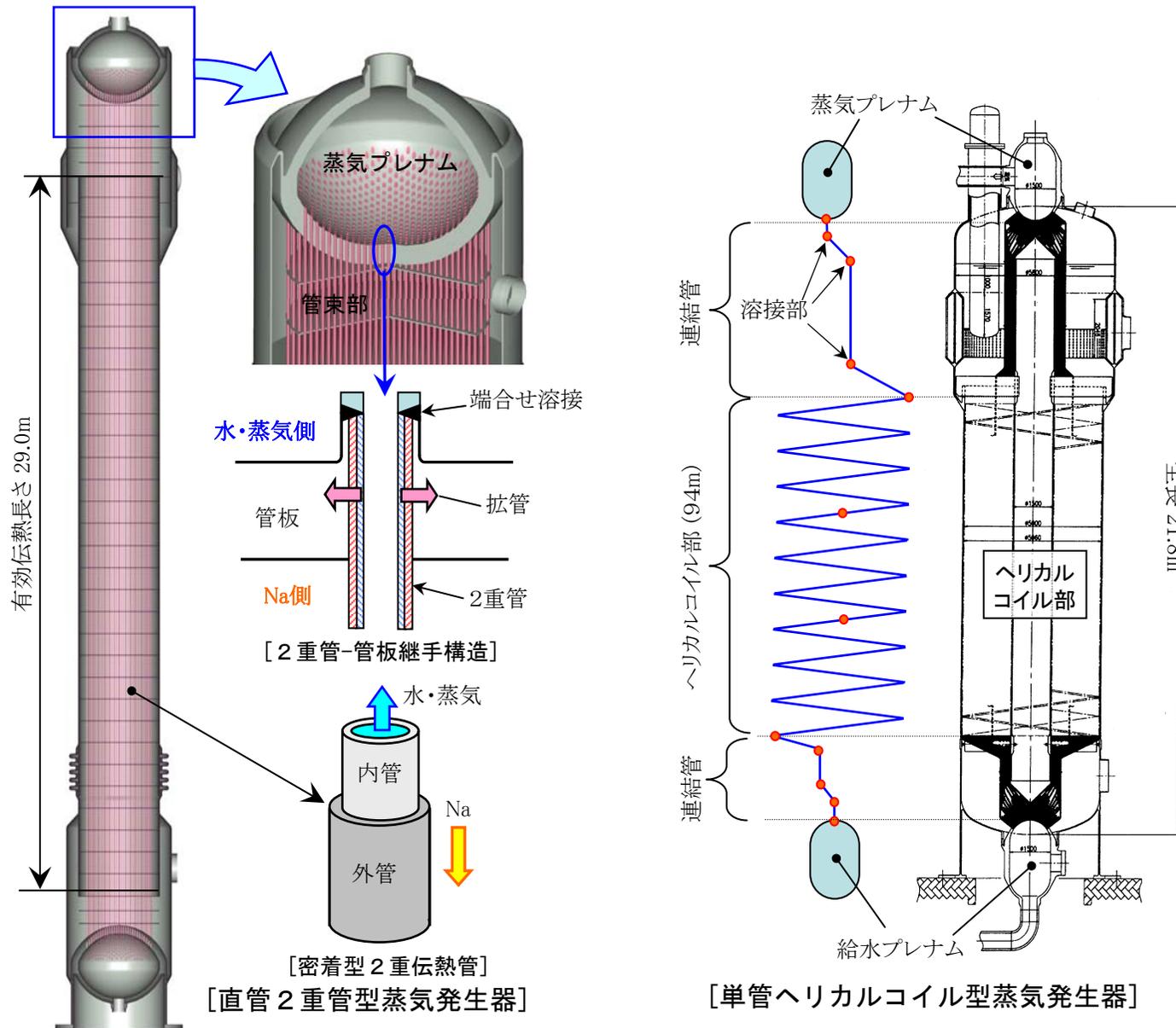


表1-2-6 ヘリカルコイル単管型との信頼性比較

直管2重伝熱管SGは、今後の研究開発が必要であるものの、伝熱管の検査精度を高めることによって、単管ヘリカル型SGよりも高い信頼性を確保可能。

		直管2重管SG	単管ヘリカルコイルSG
伝熱管	本数/伝熱長	7230本 / 29m	910本 / 94m
	外径 肉厚	19.0mmφ / 外管1.5、内管1.1mmt (暫定値)	31.8mmφ / 3.3mmt
溶接数	管-管板溶接	7230力所/管板×2(上下管板) = 14460力所	910力所/管板×2(上下管板) = 1820力所
	管-管溶接	0 力所	コイル部 : 2力所/本×910本 = 1820力所 連結管 : 8力所/本×910本 = 7280力所
破損原因		溶接箇所数は、ヘリカルコイル型が約2/3	
伝熱管検査精度		(1) 内管の検査精度 (UT, ECT)は、直管方式のため良好。 (2) 外管の検査精度は、界面の存在により、低下する。(ただし、基礎試験では、超音波UTによる外管き裂は検知できる可能性がある) (3) 管-管板継ぎ手の検査性は、アクセス性の観点から良好。	(1) コイル形状や連結管の曲部構造、及び長尺管(約120m)のため、検査プローブの挿入性が低下する。さらに、プローブのガス圧送による振動等により、検査精度は直管方式に比べ低下するが、単管故に問題は少ない。 (2) 管-管溶接部に生じた欠陥の検出性は、伝熱管母材部に比べ低下。
き裂進展阻止機能		内管と外管の構造分離により、界面でのき裂進展を阻止することが期待でき、片側が破損しても残された側でナトリウム-水反応の発生を防止できる。(今後、時効影響を考慮した試験を実施予定)	単管のため、発生したき裂の進展を、管壁肉厚途中で阻止することは困難。ただし、2重管よりも肉厚が厚いため、貫通き裂に至るまでの時間余裕が長く、またウェステージ型破損に対して耐性が高くなる可能性はある。

管蒸気発生器が提案されている。「もんじゅ」で用いられている伝熱管は、直管ではなくヘリカル（らせん状）単管であり、これにより熱交換に必要な表面積を確保している。

蒸気発生器の大型化に伴い、伝熱管破損時の水リーク検知時間は一般に長くなり、破損伝播の可能性が高くなる。このため、ヘリカル単管蒸気発生器の単純な大型化は適切ではなく、なんらかの対応が必要となるが、容易ではないと考える。従って、これを代替技術とするためには、水リーク検知手段の高度化、あるいは、小型の蒸気発生器を1ループあたり複数設置する設計（デメリットとして、経済性の低下に留意）などを考慮すべきである。

### iii. 二重管蒸気発生器の安全設計思想と採用判断にあたっての留意事項

二重管伝熱管を単管伝熱管と比較した場合、熱伝達性能が若干劣ることから機器の大型化や製造コストの上昇につながるものの、安全性の観点からは、伝熱管に何らかの原因でき裂が生じた場合でも内外管の境界でき裂が停止する効果を期待できると考える。

原子力機構は、二重管伝熱管の健全性を担保する方策として、定期検査時に内外管全数検査を行うこととしている。これにより、二重管伝熱管を採用した場合、ナトリウム中への大規模な水リークを設計基準外事象とできるとしている。しかし、二重管は検査性能の面で単管に比べ課題が多く、水リークの検出性能、二重管の密着性の誤差も考慮して設計を行うことが必要であると考ええる。

従って、二重伝熱管を採用可能であるか否かを判断するためには、安全裕度をどの程度確保することが合理的であるかなどを含めて、総合的な比較を行う必要があると考える。（図1-2-22、表1-2-6及び図1-2-23参照）。

### iv. 変形大型管板の成立性

二重管伝熱管はオフセンタで球形管板を貫通する設計となっている。このような変形大型管板については、製作性の検討とともに、設計手

図 1 - 2 - 2 3 直管二重管蒸気発生器のNa・水反応防止の考え方と水リーク時の影響緩和

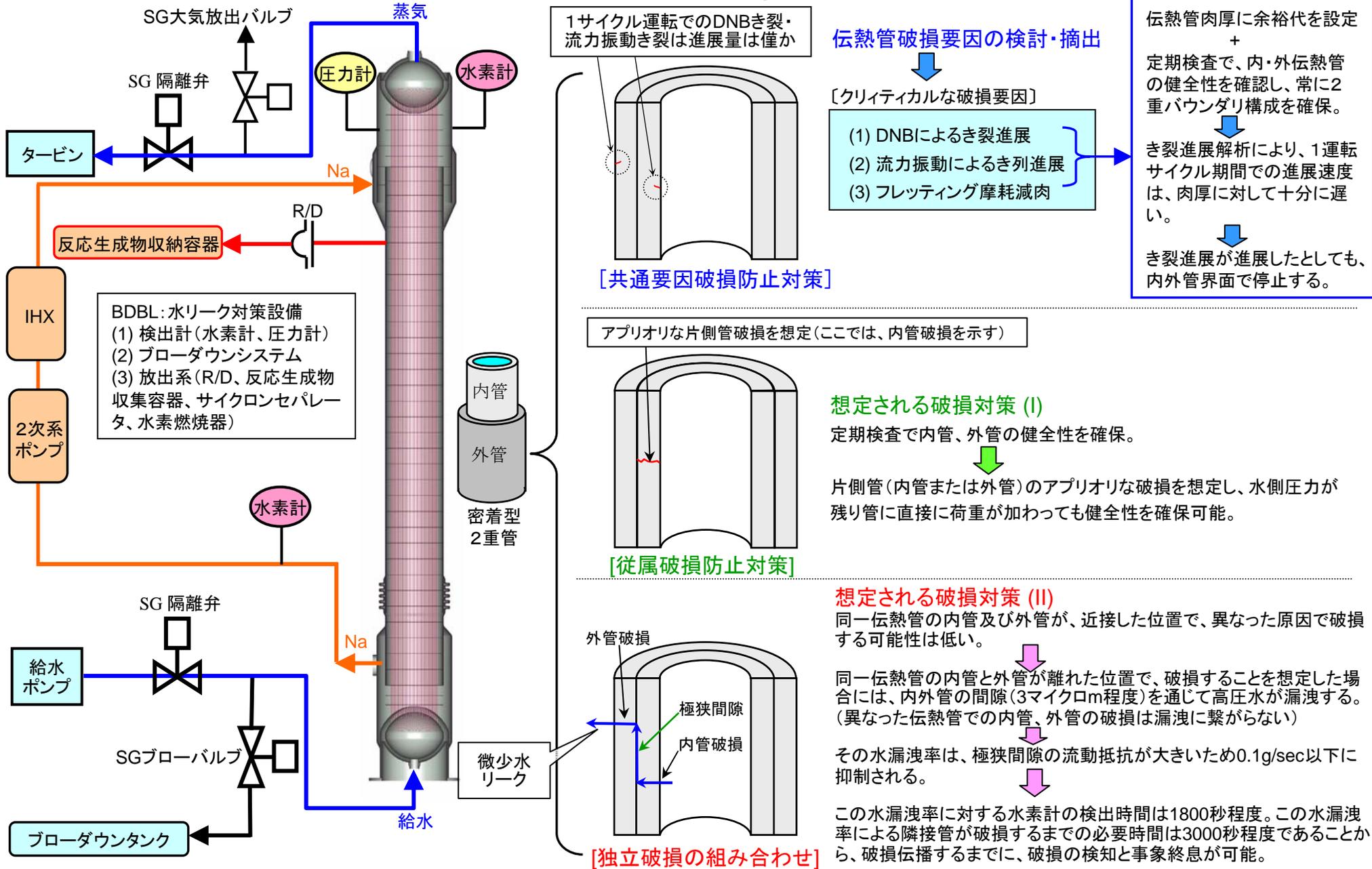
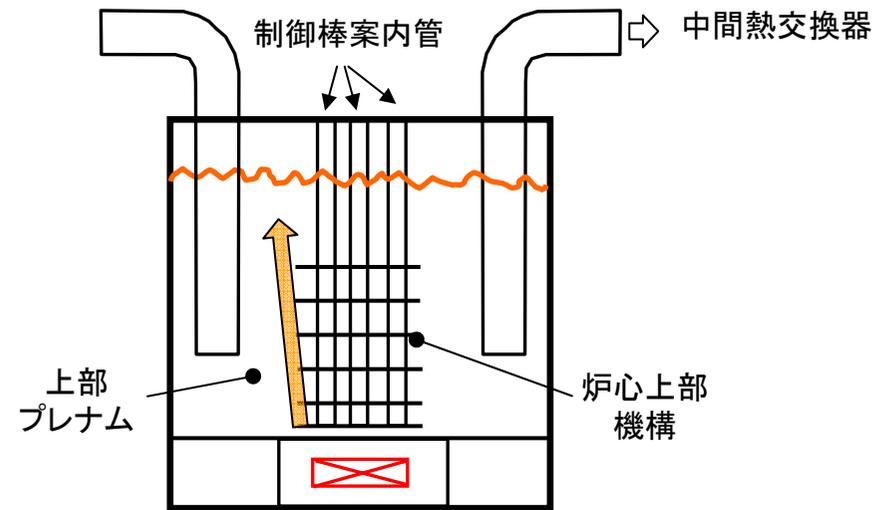
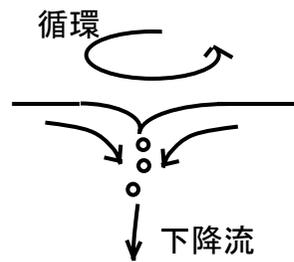


図1-2-24 原子炉容器内のナトリウム自由液面からのカバーガス巻き込み



旋回渦によるガス巻き込み発生  
(液面近傍の流速に依存)

炉心出口からの噴流により  
液面部の揺動、流速増加

水による模擬試験結果

法の確立及び許認可性の見通しを得る必要があると考える。

## ② 2ループ化

### i. ガス巻き込みの影響

軽水炉は冷却材である水を加圧状態で利用しており、万一の配管破断などの際には減圧に伴い冷却材に大量のボイドが発生することが想定されるため、「ボイド反応度係数が負」（出力の上昇などによりボイドが発生した場合、核分裂に寄与する熱中性子が減少、核分裂連鎖反応が抑制され、その結果、出力が低下する）となるように設計される。

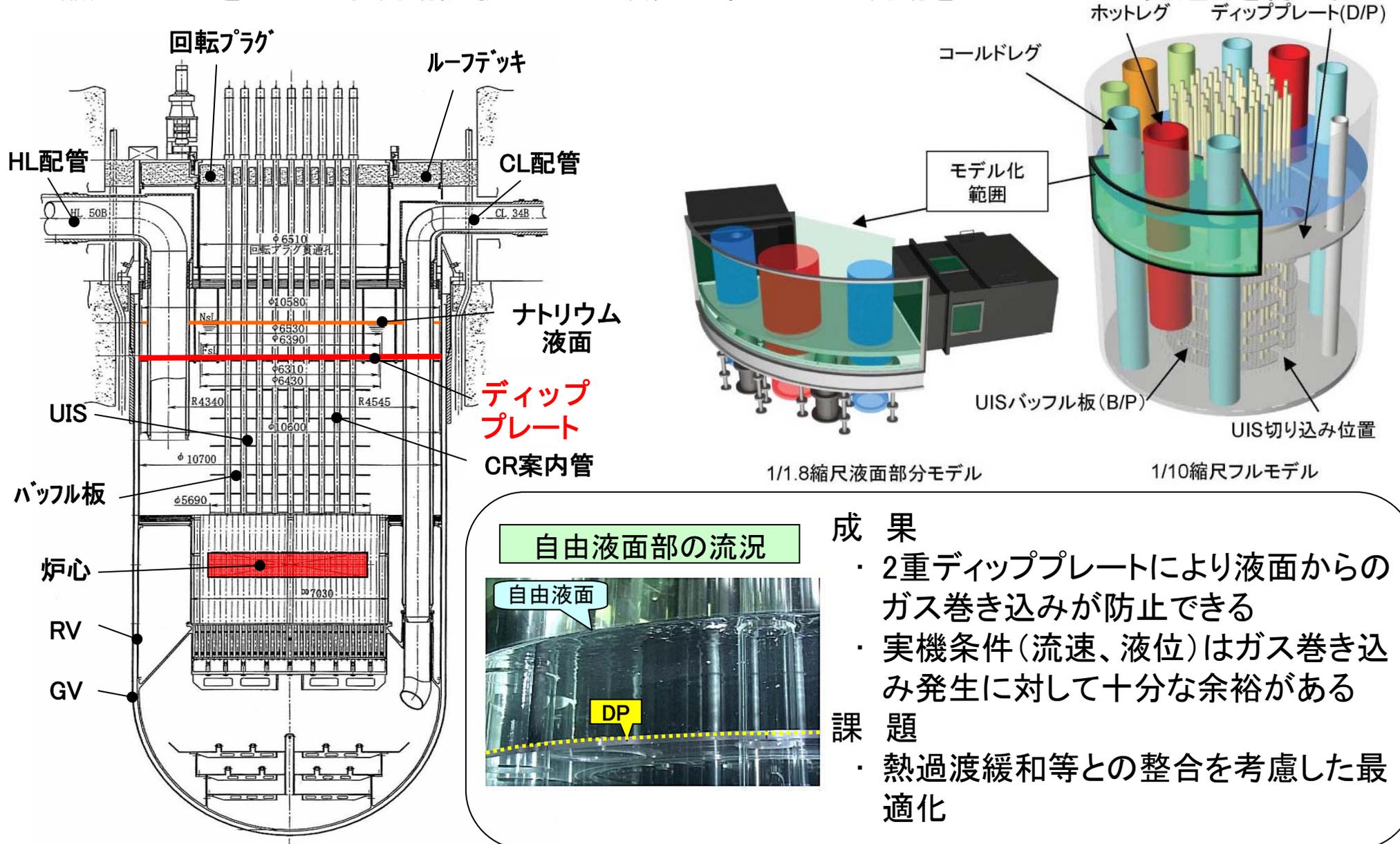
一方、ナトリウム冷却高速増殖炉では、冷却材密度が減少すると核分裂に寄与する高速中性子が増加し、反応度は大きくなることから、「ボイド反応度係数が正」となる。特に、炉心の大型化に伴ってその傾向が強まる。しかし、ナトリウム冷却高速増殖炉は、冷却材が低圧系であるため、配管破断等を想定してもガードベッセル等によって炉心冷却材の炉心からの流出が抑制され、また想定される種々の異常に対しても炉心冷却材が沸騰せず、ボイドが発生しないよう設計されている。

しかし、例えボイドが発生しない設計であるとしても、冷却材ナトリウムに何らかの原因で気泡が混入し、炉心を通過する可能性を否定することはできない。その原因としては、冷却材中に溶存しているガスの低温部での析出、制御棒から放出されるヘリウムガス、冷却材界面でのガス巻き込みなどが考えられる。

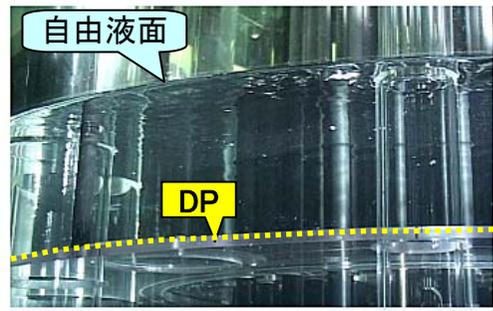
「FS フェーズⅡ報告書」では、原子炉から熱を取り出す冷却系統を2系統にし（2ループ化）、機器・配管の物量や原子炉建屋全体の体積などを抑える設計が提案されている。この際、1系統から取り出すべき熱量が大きくなることから、配管を大口径化（もんじゅの約1.5倍以上）するとともに、配管内を流れるナトリウムの流速をこれまでより速くする（もんじゅの約1.5倍～3倍近く）ことが提案されている。また、原子炉容器上部プレナム内のナトリウムの流速が速い設計となっている。このため、原子炉容器内のナトリウム自由液面（表面）から渦流によってカバーガスを巻き込む（カバーガス巻き込み）可能性

# 図1-2-25 原子炉容器上部プレナム流動適正化(ガス巻き込み防止)

縮尺モデルを用いた水流動試験によって、炉上部プレナム流動を適正化できる見通しを得た。



## 自由液面部の流況



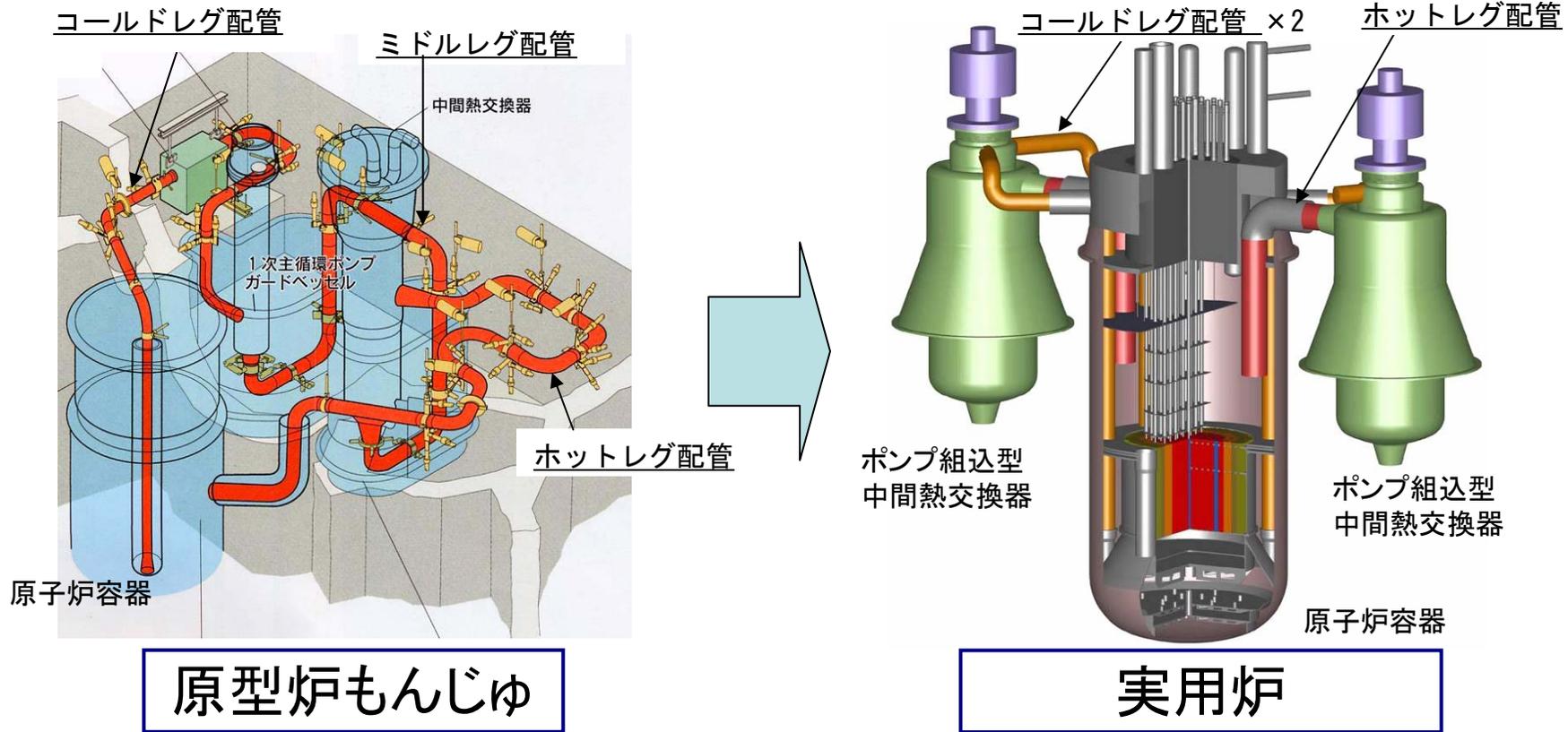
## 成果

- ・ 2重ディッププレートにより液面からのガス巻き込みが防止できる
- ・ 実機条件(流速、液位)はガス巻き込み発生に対して十分な余裕がある

## 課題

- ・ 熱過渡緩和等との整合を考慮した最適化

図1-2-26 高クロム鋼による配管短縮の効果



原型炉もんじゅ

(電気出力28万kW)

1次系配管設計「もんじゅ」との比較

実用炉

(電気出力150万kW)

		口径	配管長/ループ	総配管長
実用炉 配管材料: 12Cr系鋼 ループ数: 2ループ	ホットレグ配管 (550°C)、1エルボ	127 cm	13.4m	135 m
	コールドレグ配管	86 cm	26.9m × 2	
「もんじゅ」 配管材料: SUS304 ループ数: 3ループ	ホットレグ配管 (529°C)、8エルボ	81 cm	39m	336 m
	コールドレグ配管	61 cm	41m	
	ミドルレグ配管	81 cm	32m	

が高くなる傾向にあると考えられる（図1-2-24参照）。

ナトリウムの自由液面から巻き込んだガスが、炉心冷却材の主流に入り、炉心燃料領域を通過するとなれば、正の反応度効果や燃料ピンの冷却を阻害する効果の発生が懸念される。このため、原子炉容器内でガス巻き込みを防止するために、二重デッドプレートという整流効果を持つ構造物を上部プレナム部に設置し、ガス巻き込みを抑制する方策が提案されている（図1-2-25参照）。しかし、反応度の上昇は原子炉に重大な影響を与える可能性があることから、ガス巻き込みが工学的に十分抑制できるものであるかどうかなど、安全性に関連して十分な検討を行うことが必要であると考えられる。

## ii. 大口径配管の課題

ナトリウム冷却高速増殖炉では、冷却材ナトリウムの運転時と停止時の温度差が一般的に大きい。このため、ループ型炉では温度差に伴う配管や容器の膨張・収縮が力として配管に大きく加わることになり、これを分散するため配管に多数のエルボ部（配管を曲げた部分）を設けて応力を分散させる工夫が取られている。

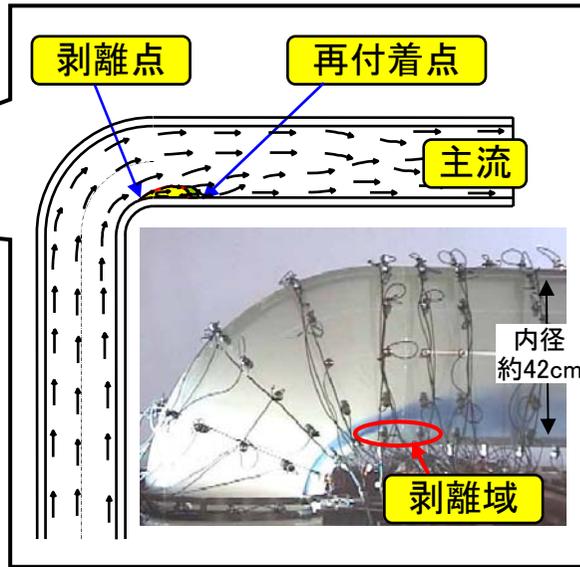
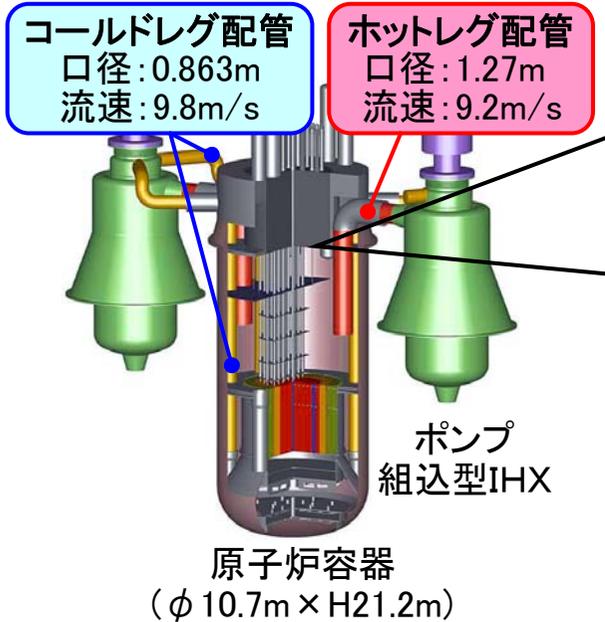
「FS フェーズII 報告書」で提案されている設計の場合、原子炉の出口温度約 550 °C、入口温度約 395 °C、停止時温度約 200 °Cとなっている。冷却系配管は室温（プラント建設時）から運転温度に昇温され熱膨張することにより応力が発生し、応力の大きさは材料の熱膨張特性と配管の引き回しに依存する。仮に、「もんじゅ」に使われている配管材料と同じオーステナイト系ステンレス鋼を用いて設計した場合、応力分散に必要な配管の長さやエルボ数を十分に確保する必要が生じ、コンパクトな建家とすることが困難になる。経済性を向上させる観点からは、ループ数を減らすことはもとより配管を短くすることが効果的であり、このため、種々の革新的な技術の採用と併せて、熱膨張が小さく強度が高い新しい配管材料として高クロム鋼を用いることが提案されている（図1-2-26参照）。

また、150 万 kWe の出力で冷却系を 2 ループ構成とするため、配管口径と冷却材流速を従来の設計と比べ大きなものとしている。このよ

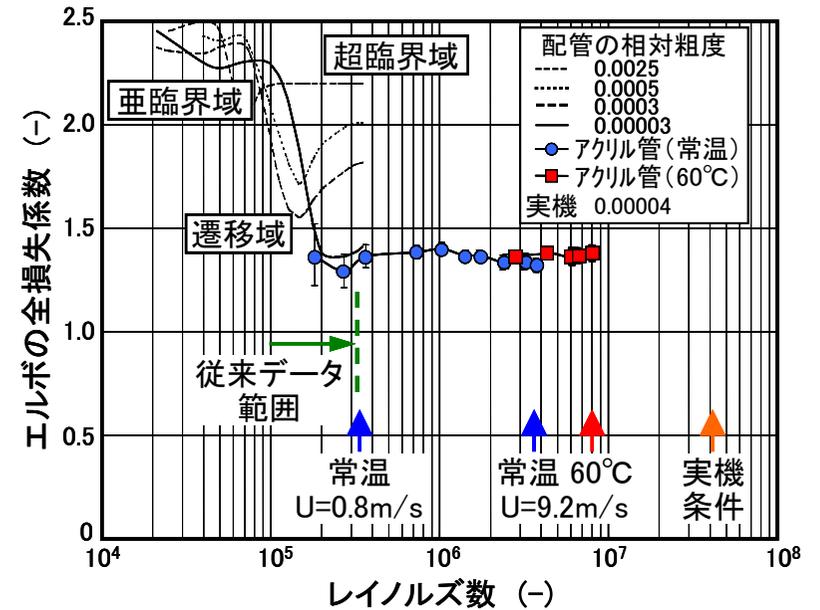
図1-2-27 高流速・大口徑配管内流動

課題: 冷却系ループ数の削減に伴い大口徑配管を採用 ⇒ Na流速増加による流動励起振動

目的: エルボを含む配管系の流動・振動特性の把握 (実機ホットレグ配管の1/3縮尺水試験)



実機流速(9.2m/s)での流動状況



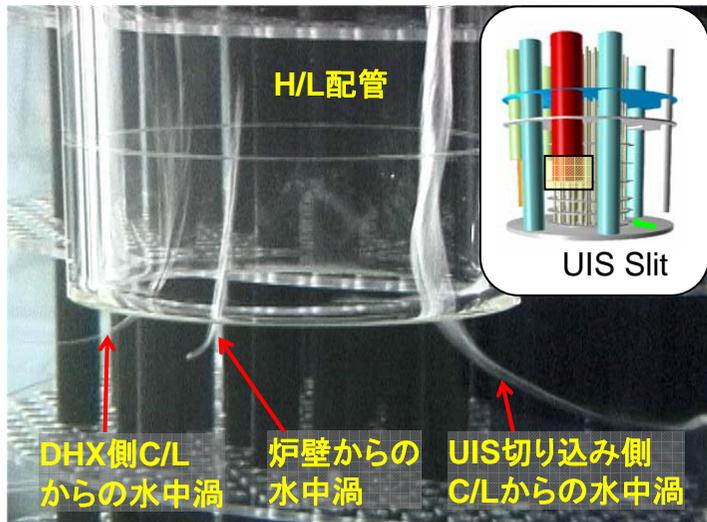
圧損係数のレイノルズ(Re)数依存性



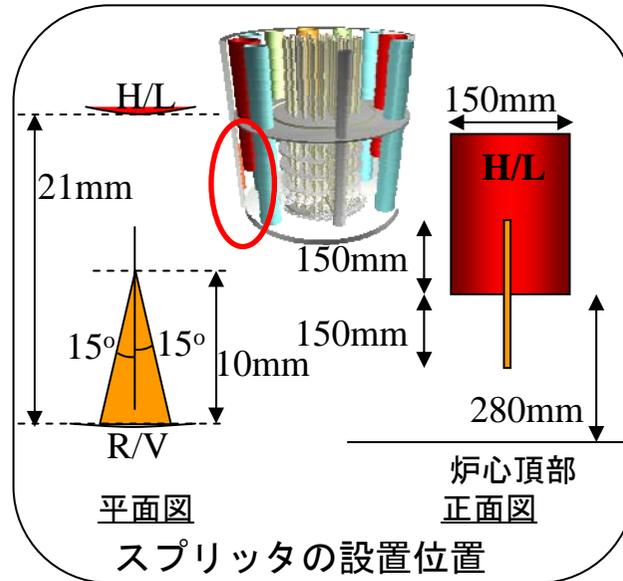
- エルボ圧損係数は、高Re数条件においてもほぼ一定。  
⇒ 剥離域の大きさ等、流況はRe数に依存しないことを確認。
- 振動の要因となる管壁での圧力変動特性は、管内流速に依存。
- 実機配管で発生する最大応力は、配管材の設計疲労限度以下。

→ 詳細は11~19ページの添付「大口徑配管の流動試験」を参照

図1-2-28 原子炉容器上部プレナム流動適正化(キャビテーション防止)



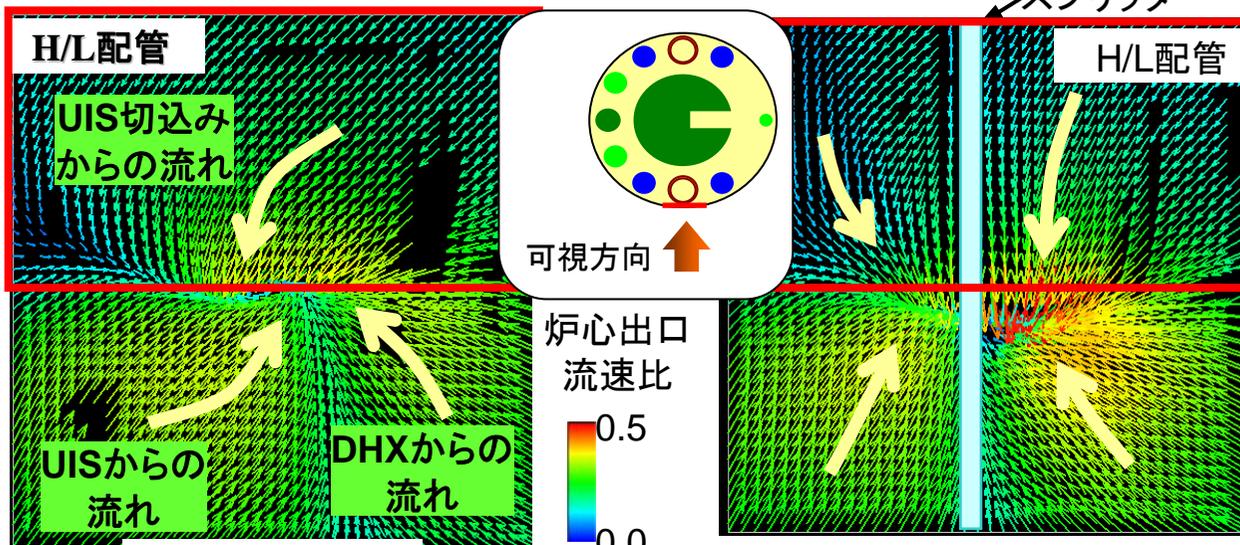
水中渦の発生状況



スプリッタの設置位置

成果

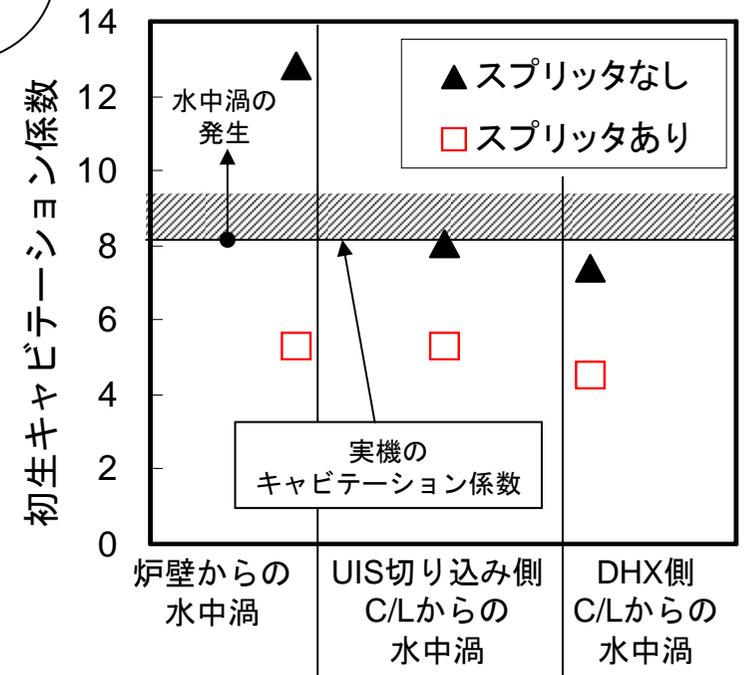
- 液中渦発生防止対策(フロープリッタ等)を具体化し設計に反映



スプリッタなし

スプリッタあり

スプリッタの有無による流速ベクトルの比較



流動最適化による水中渦の抑制効果

うな大口径で高流速となる配管では、流れの乱れとそれに伴う振動が課題となる。これに対応し、FS フェーズⅡでは既に、実機の 1/3 縮尺試験装置を用いて水流動試験を行い、エルボ部を含む配管内の流動と振動特性を確認している（図 1-2-27 参照）。

しかし、振動特性については実機に近い条件での確認、及びキャビテーション（発泡現象）やエロージョン（流れによる配管材料の減肉現象）などの流動特性に対する確認を行うことが必要であると考え（図 1-2-28 参照）。また、大口径のわりに管厚が薄い配管であり、配管の製作性や配管支持のあり方についても検討を要すると考える。

### iii. 安全設計で想定している条件の成立性

冷却系 2 ループ化に適合するための安全設計（短期の炉心冷却）は重要である。安全評価では流量急減時の炉心反応度フィードバック特性が重要であり、ドップラー係数、冷却材温度係数等の反応度係数の不確かさをより低減するために、高速増殖炉の実機でのデータと MA に関する核データを拡充することが必要であると考え。

## ③ 主循環ポンプ組み込み型中間熱交換器の課題

### i. 設計の際の判断基準

「FS フェーズⅡ報告書」においては、システムのコンパクト化を図るため、炉心からの熱を運び出すナトリウムを循環させるための主循環ポンプと炉心からの熱（一次系の熱）をその外側の系統（二次系）へ伝えるための中間熱交換器（IHX）を一体化した主循環ポンプ組み込み型中間熱交換器の採用が提案されている。

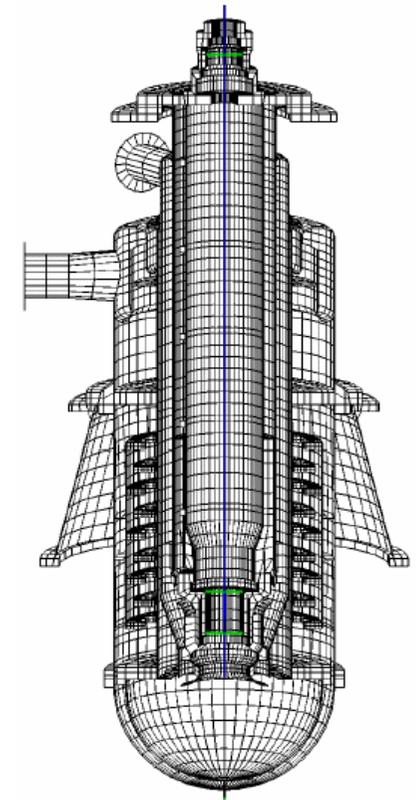
FS フェーズⅡでは、実機の 1/4 規模の試験体を用いて試験を行っている（図 1-2-29 参照）。具体的には、試験体に、①ポンプと IHX の間の熱伝達防止及び流体を介した振動伝達減少のために、ポンプと IHX 構造間にガス層を配置する、② IHX 中心部の狭い空間にポンプを収めるために、ポンプを従来のように剛構造とせず、ケーシングのコンパクト化が可能な柔構造とする、などの工夫を施している。また、

図1-2-29 中間熱交換器伝熱管摩耗防止  
(1/4スケール振動伝達試験・解析による設計手法開発)

- 振動伝達試験  
1/4スケール水試験により機器  
内振動伝達データを取得  
－ 解析モデルの検証データを  
得る
- 解析モデル開発  
3次元シェルモデルに流体要素  
も考慮したモデルを開発



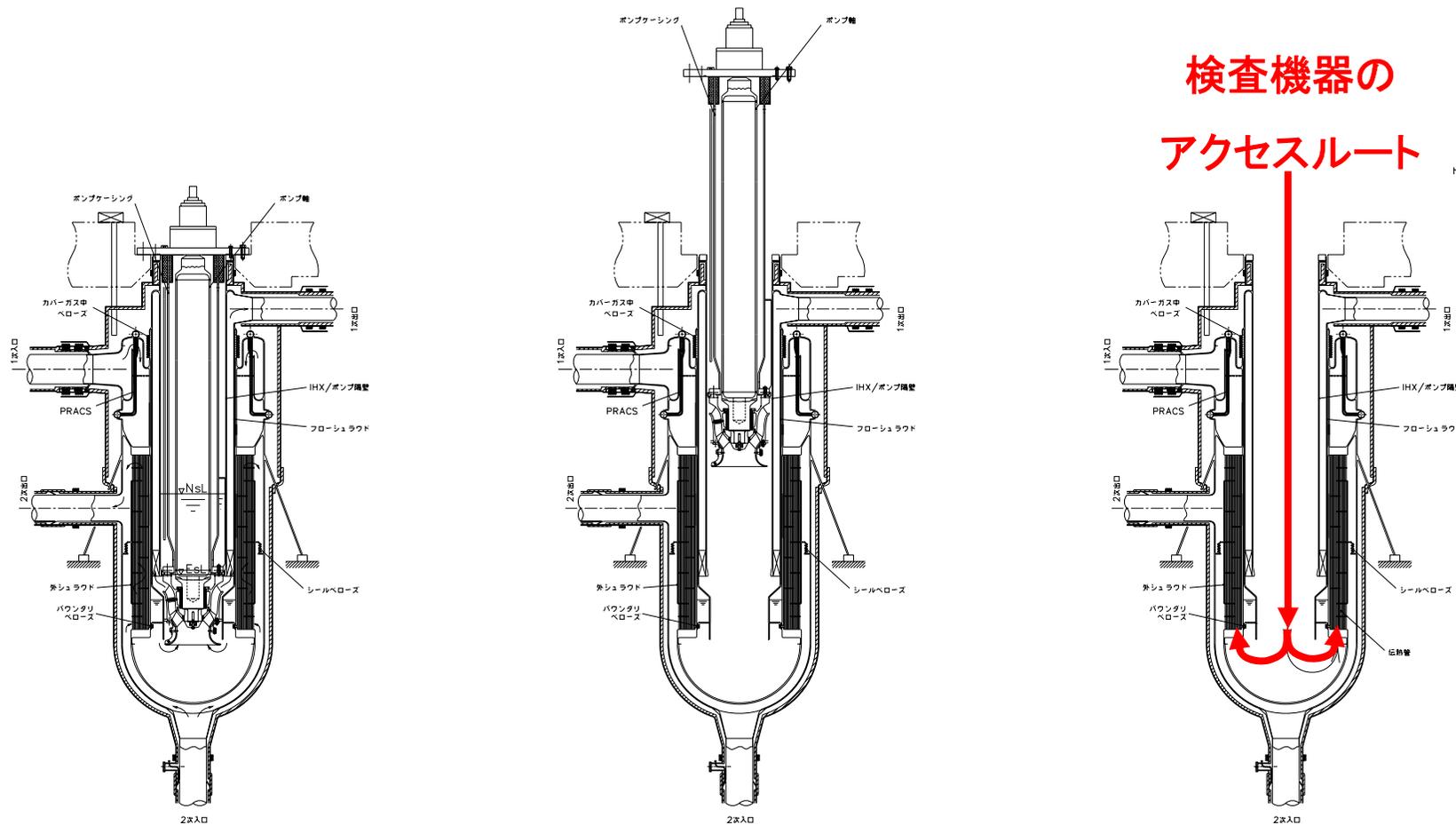
1/4スケール試験体



試験体解析モデル

図1-2-30 主循環ポンプ組み込み型中間熱交換器の検査性について

万一、容器内部の下部にある構造(バウンダリベローズ、下部管板、伝熱管)の検査の必要が生じた場合、ポンプを引抜くことによってアクセスルートを確認することが可能



通常時

主循環ポンプの引抜

検査機器へのアクセスルート確保

試験により、振動特性を確認するとともに、静圧軸受部の安定性解析、振動伝達解析モデルによる評価などが行われている。これらにより、技術的な見通しが得られたとしている。

しかし、従来、高速回転機器である主循環ポンプについては振動を防止するために剛構造の設計がなされ、また、熱交換器については、伝熱管部分に薄肉の材料を使用することから振動に弱くなるため、振動の発生源から分離した設計としている。主循環ポンプ組み込み型中間熱交換器の設計においては、この相矛盾する設計の要求を一体の機器に持ち込むという点でこれまでにないものである。このため、両機器の合体に伴って要求される構造健全性判断条件、運転時の制限条件、等の新たな設計制限条件を把握した上で、十分な試験や解析評価を行うことが必要であると考ええる。

## ii. 検査性への配慮

機器を実用化する際には、検査性も重要な要素である（図1-2-30参照）。特に、主循環ポンプ組み込み型中間熱交換器はこれまでにない革新的な技術であり、また、原子炉の一次系を構成する重要な機器であることから、検査性に関しても十分な配慮をした開発を行うことが必要であると考ええる。