

PNC PN 1410 95-087

本資料は2007年7月31日付けで  
登録区分変更する。 [技術展開部技術協力課]

信頼性・経済性を目指した  
核燃料リサイクル技術の開発  
—高速炉の研究開発課題—

第28回 報告と講演の会  
口頭発表及びスライド資料集

平成7年10月

動力炉開発推進本部

「報告と講演の会」口頭発表原稿

平成7年10月5日

信頼性・経済性を目指した  
核燃料リサイクル技術の開発

—高速炉の研究開発課題—

動力炉開発推進本部

副本部長 柳沢 務

【スライド1】      A：タイトル  
                         B：目次

動力炉開発推進本部の柳沢でございます。

「信頼性・経済性を目指した核燃料リサイクル技術の開発」の第二部として、「高速炉の研究開発課題」について報告させていただきます。

ここでの目標は、安心できる、経済的に魅力のある高速炉を開発することです。高速炉の開発に対する動燃の基本方針には、「核燃料の安定供給、有効利用はもとより、原子力発電の有利性を最高度に発揮せしめるため」と謳われております。

核燃料サイクルと調和のとれた高速炉の開発の究極の目標は、相当に高いレベルに設定されていると言えます。

第一部で述べられたように、エネルギーの経済性について高い関心を呼んでいる中、実用化を目指している高速炉の経済性の向上を中心として、さらに、信頼性・安全性の向上に向けての研究開発の取り組みについて、ご報告いたします。

【スライド2】      A：高速炉の信頼性・経済性目標  
                         B：Blank

高速炉の開発目標として、経済性では軽水炉との共存が長く続くことを考え、発電コストを軽水炉と同等以下に抑えることが必要です。そのため、高速炉の初号機でも建設単価で軽水炉と同等以下となるよう設定しました。

また、信頼性・安全性の目標としては、誰もが安心感の持てるプラントであって、故障が少なく計画外停止の発生頻度や稼働率が軽水炉並を目指しています。

**【スライド3】**      A：高速炉による核燃料リサイクルの経済性目標  
                         B：高速炉による核燃料リサイクルの経済性評価

第一部で紹介がありましたが、高速炉の建設単価を軽水炉並とすることによって、高速炉の燃料製造及び再処理単価に調整の幅が与えられることになりました。

高速炉による核燃料リサイクルの経済性目標は、高速炉の建設単価を軽水炉以下とする他、稼働率を85%以上に、高速炉と核燃料サイクルの仲介を担う燃焼度を15万MWd/t以上に、燃料製造、再処理単価は既に述べられたように、それぞれ3倍以下、2.5倍以下を設定しました。

この目標に対して、2030年頃の実用化の技術の姿としては、高速炉の建設単価は軽水炉並から0.8倍程度に、稼働率、燃焼度は目標並に、燃料製造、再処理の単価は第一部での評価のように、2.6倍、2.0倍程度を達成できる見通しが得られました。

**【スライド4】**      A：高速炉実用化までの建設単価推移  
                         B：将来プラントの発電コストの目標値と評価値

ここに到るまでの高速炉の建設単価の推移を左のスライドに示します。

「もんじゅ」の技術を130万kWeのプラントに換算すると、軽水炉比2.7倍になります。一方、現在、計画が進められている実証炉の技術をベースにした130万kWeのプラントを「基準プラント」と呼びますが、これは軽水炉比1.5倍になります。2030年頃の実用化の技術確立の段階の130万kWeの革新技術に基づくプラントを「将来プラント」と呼んでいます。その建設単価は初号機で軽水炉並、複数基で0.8倍となります。

将来プラントの発電コストを今回の目標とした軽水炉と比較してみます。高速炉の将来プラントでは、6.7円/kWhと評価され、軽水炉の6.9円/kWhを若干下回っています。軽水炉の発電コストは、これまでの実績の推移と

将来の技術開発によるコスト低減を考慮しております。

なお、実用化までの推移及び建設単価低減のための開発課題については、実証炉の実施主体である日本原子力発電と共同で検討を行ってきました。

【スライド5】      A：「もんじゅ」から基準プラントへの建設単価低減  
                         B：配管の短縮化

「もんじゅ」の技術を130万kWeに外挿したプラントの建設単価を1とした場合、実証炉技術による「基準プラント」の建設単価は約45%の低減となっており、その主な要因をスライドに示します。

「基準プラント」は「もんじゅ」と比較した場合、原子炉構造、冷却系等の簡素化により13%の低減が図れます。その他、全体の物量が減ったことによる配置等の合理化、建設工期の短縮等による間接費の低減の効果もあります。

冷却系の簡素化では、配管の短縮化や蒸気発生器の一体貫流型、オーバーフロー系等のナトリウム補助設備の削減があります。

代表的な技術として配管の短縮化について、「もんじゅ」と比較して右のスライドに示します。「もんじゅ」は500℃以上になるナトリウム配管の熱膨張を配管の引き回しによって吸収していたのを、配管を容器に差し込む方式によって縦方向に吸収し、大幅に配管を短くすることができました。実証炉では、これをトップエントリー方式によって実現しています。出力60万kWeのプラントの原子炉容器から蒸気発生器までの配置は、28万kWeの「もんじゅ」の約半分の中に収まっています。

【スライド6】      A：基準プラントから将来プラントへの建設単価低減  
                         B：将来プラント概念

次に、今度は実証炉段階の「基準プラント」の建設単価を1とした場合、「将来プラント」の建設単価は、33%の低減となります。

その主な要因は、炉心の高性能化や2次ナトリウム系削除等の革新技术による原子炉構造、冷却系の簡素化によって15%、その他、ナトリウム漏えい対策のライナー設備の簡素化、熱効率向上、さらに波及効果として、建物の縮小による配置の合理化により5%、建設工期の短縮等による間接費の低減により10%の効果が可能となります。

高速炉の将来プラントの概念を右のスライドに示します。

高燃焼度のダクトレス燃料による高性能の炉心で、受動安全性を強化した新型炉停止機構を採用しています。

また、冷却系では、電磁ポンプ内蔵型の2重管蒸気発生器を採用して2次ナトリウム系を削除するとともに、水平免震建屋と機器上下免震を組み合わせた3次元免震の技術を採用しています。

【スライド7】      A：原子炉建屋形状の比較  
                          B：将来プラント概念

「もんじゅ」から「基準プラント」を経過して「将来プラント」に到るまでの原子炉建屋形状を比較してみます。

出力130万kWeの「将来プラント」は、28万kWe「もんじゅ」の中に4つ程収まる大きさであることが分かります。

なお、この配置について、定検作業の観点からも今後、検討を加えていきます。

右のスライドは、「将来プラント」の鳥瞰図ですが、2次ナトリウム系の無い分、相当すっきりした姿になっています。

【スライド8】

A：目次

B：経済性向上のための主要な研究開発課題

ここまで、高速炉の経済性・信頼性の目標と将来の経済性見通しについて、お話ししてまいりました。

次に、これらの目標達成、特に2030年頃の「将来プラント」に向けた研究開発課題に対する取り組みの一端をご紹介します。

まず、経済性向上に着目した研究開発からご説明します。経済性の向上には、炉心の高性能化及び原子炉構造や冷却系の簡素化があります。

これには、2次ナトリウム系の削除、3次元免震構造の採用、機器合体等の高度化の技術が含まれます。

これらの技術は、高速炉固有の技術開発を進めていくことで、大洗工学センターを中心として、実現させていきます。

高速炉固有の技術開発では、応用力を高めていくため、限界を見極めることを指向し、実験による裏付けを得ながら理論、解析による普遍化を重視していきます。

【スライド9】

A：炉心の高性能化

B：「もんじゅ」高度化炉心の構築

まず、炉心の高性能化に関しては、第一部で高燃焼度、高線出力化について紹介がありましたが、これらは2000年初頭以降、「もんじゅ」の高度化炉心として中空ペレットを用いて、燃焼度を10万、12万から15万MWd/tと上げて実証していく計画にしております。

これらの成果は、実証炉の燃料に反映できるようにします。

また、運転サイクルの長期化により将来プラントの稼働率は、85%以上を達成していきます。

**【スライド10】** A：心の高性能化  
B：ダクトレス燃料集合体

炉心構成要素の軽量化として、ダクトレス燃料について紹介します。

高燃焼度化に伴い出力変動が大きくなり流量配分の意義は薄れていくため、流量配分を行わないダクトレス燃料の魅力が出てきます。

燃料ピンをグリッドスペーサーを用いて束ねることにより、ダクトとしてのラッパ管を削除します。

これで燃料の体積割合を増加させ核的性能を高めて、運転サイクルの長期化ができます。

さらに、エントランスノズル部を燃料集合体から切り離し、原子炉構造に組み込むことで、燃料集合体を短くでき、炉容器の高さを低くできます。また、ラッパ管が不要となることから、再処理や廃棄物の負担軽減につながります。

これまでの燃料に比べて約4割程度の廃棄物量の削減が可能と評価しています。

ダクトレス燃料については、今後、流量配分や炉心への挿入・引き抜き性などに対し、研究開発を続けていきます。

**【スライド11】** A：2重管蒸気発生器の課題  
B：小型2重管蒸気発生器の実験と解析の比較

次に、原子炉構造や冷却系の簡素化のうち、2次ナトリウム系削除に関する開発ですが、経済性向上の効果が極めて大きいものの、海外でも例のない革新的な技術であり、長期的課題として取り組んでいきます。

2次系削除システムについては、現行の2次系がもっている機能をどのようにして確保するかが課題となります。

2次系削除システムの中核となる2重管蒸気発生器の信頼性向上を中心に、成立性評価の研究を進めています。



2重管蒸気発生器では伝熱流動特性の把握と安全性、信頼性の評価が課題となります。

密着2重伝熱管を用いた1MWの蒸気発生器による、伝熱特性試験の結果をスライドに示します。ナトリウムと水の温度の計算値と実験はよく一致しており、解析によって伝熱性能を十分予測できることがわかります。

なお、伝熱管を2重にすることによる伝熱面積の増加分は、7%程度であります。

- 【スライド12】 A：2重管蒸気発生器の課題  
B：2重管蒸気発生器内管リーク検出試験

伝熱管破損の検出が安全性、信頼性の上でキーとなる技術です。  
蒸気が2重管の間隙に漏れる内管リークの検出試験をスライドに示します。

模擬欠陥孔より、蒸気を注入してから5分以内に湿分濃度が上昇しており、リーク検出が十分可能であることを示しています。

今後、外管リークの検出法、リーク伝熱管の同定法や電磁ポンプの組み込みによる合体等の検討を続けていきます。

- 【スライド13】 A：機器上下免震による地震荷重緩和  
B：大型皿ばねによる機器上下免震要素の効果

次に、3次元免震による簡素化について触れます。

高温・低圧系である高速炉にとって、地震荷重の緩和は有効ですが、動燃では、民間が中心になって進めている建物の水平免震と組み合わせた機器の上下免震についての先駆的・基礎的研究を進めています。

機器上下免震構造は、水平免震の建屋に収納された原子炉容器と一次系機器をコモンデッキとよぶ共通の床に搭載し、これを大型の皿ばね免震装置に

よって上下方向の振動を緩和する構造になっています。

右の解析評価では、機器上下免震を採用することによって、上下方向の応答加速度が約半分に低減する結果を得ています。

【スライド14】 A：機器上下免震による地震荷重緩和  
B：コモンデッキ方式免震構造の振動試験

この減衰の効果を実験で確認するため、大洗工学センターで振動試験を実施中です。

右のスライドは、振動台の上にコモンデッキ方式の免震構造を載せて、実験をしている様子を示したもので、大きな円盤がコモンデッキで、炉容器、ポンプ、中間熱交換器を模擬した構造を皿ばねで支えています。

【スライド15】 A：高速実験炉「常陽」  
B：「常陽」改造概要（MK-III）計画の概要

これまでは、将来プラントの経済性向上に向けた革新的技術の研究開発に絞って説明してきましたが、次に、現在、将に実証しようとしている経済性向上の技術について、「常陽」を例にとって紹介したいと思います。

実験炉「常陽」は、現在、照射能力を向上させるための改造計画、MK-III計画、を進めており、先月末に、設置変更許可を頂いたばかりであります。

- 【スライド16】 A：「常陽」炉心構成  
B：「常陽」改造概要（MK-III）計画の概要

MK-III計画は、照射能力を約4倍に向上させるため、炉心と冷却系の改造を行うもので、熱出力を100MWから140MWに増加させます。

炉心領域を一回り大きくして中性子束の増加と平坦化を図り、照射試験体の数を2倍に増やします。

- 【スライド17】 A：「常陽」炉心構成  
B：MK-III炉心における技術確証

燃料の被覆管には実証炉でも採用されるPNC1520という新材料を使用し、燃料の長寿命化や高温化につながる技術として期待しています。

また、遮へい集合体にはB4Cを用いて遮蔽能力を強化したり、反射体にはフェライト鋼を採用して、炉心構成要素の長寿命化を図っています。

これらの技術は、炉容器の小型化や炉心構成要素の長寿命化につながる技術であります。

- 【スライド18】 A：常陽」MK-III主熱交換器  
B：MK-III主IHXの高度化

次に、新たに取り替える中間熱交換器ですが、これまでと同じ寸法で1.4倍の熱交換を確保できました。

これは、1次系の流量増加、出入口温度差の増大、及び高温強度に優れた316FR鋼を採用したことによります。

黄色で示すように、伝熱管をはじめ構造材として316FR鋼を用いていますが、この316FR鋼も実証炉の冷却系の材料として採用される計画であり、「常陽」で先行的に使用することになります。

**【スライド19】 A：設計許容応力の改善  
B：MK-III主IHXへの新材料の採用**

ナトリウム機器に対する高温構造設計については、試験データのきめ細かい評価に基づく高度化を進めてきて、「もんじゅ」の設計に比べて、設計許容応力がかなり改善されています。

さらに、新材料である、316FR鋼を導入することにより、従来のSUS304鋼に比べ、高温強度が飛躍的に増加しており、機器構造のコンパクト化や構造設計の自由度を広げることができます。

**【スライド20】 A：安全性向上のための研究開発課題  
B：仮想的炉心損傷に関する安全研究**

次に、信頼性・安全性向上のための研究開発に移ります。

まず、安心できるプラントを目指す安全性向上の研究開発に触れます。高速炉の安全性は、より合理的で分かり易い安全確保に向けて研究を進めております。特にプラントの中心となる炉心安全では、再臨界を排除するような方策や自然現象を利用する受動的な安全を強化する研究を行っております。

まず、再臨界の排除を目指していく炉心損傷の研究については、これまで、炉心の大きな損傷に至るような事象は、技術的には起こると考えられないとして、念には念を入れるとの観点から研究を進めてきました。

フランスを初めとする海外との共同研究を含め炉内、炉外試験により、影響を緩和するメカニズムが明らかになってきました。これらの知見は、安全解析コードのモデルの改良に反映しています。

さらに、将来に向け、炉心損傷時の再臨界の可能性を排除して、設計で配慮しなくとも良いという、分かり易いシナリオの構築を目指しています。その研究開発のため、炉内安全性試験施設の検討も進めています。再臨界の排除により、プラントシステムの設計自由度の大幅な拡大につながり、革新技術の採り入れが容易になります。

【スライド21】 A：受動的安全性の追求

B：集合体内蔵型自己作動吸収体落下機構

また、万一の事故に対しては、原子炉を止める、冷やすが基本的考え方ですが、自然に原子炉が止まり、安全に冷える試みとして、受動安全性の追求を進めています。

受動的な炉停止は、炉心の温度が異常に上昇した場合に、自然の特性で負の反応度が入り、安全に炉が停止する方策です。

一例として、集合体内蔵型の吸収体落下機構の概念を示します。異常な温度上昇により、低融点金属が溶けてボロン球が落ちる機構を組み込んだものです。

【スライド22】 A：受動的安全性の追求

B：自然循環時の燃料集合体内熱流動解析

一方、風呂桶の湯が循環するような、自然循環による崩壊熱除去は、沸点の高いナトリウムを使用することに伴う、特徴的な機能です。

自然循環時の熱流動の解明のため、ナトリウム試験や多次元の解析コードの整備を進めています。

スライドは、自然循環時の集合体間の熱移行の様子を調べるための模擬燃料集合体によるナトリウム試験の結果です。

試験体は、電気ヒータ加熱による実寸大の模擬燃料集合体3体で構成されています。

実験と3次元の解析結果は良い一致を示しています。

解析手法により、自然循環での高精度の集合体の中まで詳細な温度分布も評価できる段階にきました。

今後は、集合体間のわずかなギャップを流れるナトリウムによる冷却効果をきちんと評価する研究を行っていきます。

**【スライド23】 A：高速増殖原型炉「もんじゅ」  
B：信頼性向上のための研究開発課題**

次に、信頼性向上のための研究開発課題として、「もんじゅ」を中心とした取り組みについてお話いたします。

「もんじゅ」による運転・保守技術の高度化として、海外の高速炉において発生したトラブル等についても自分のこととして十分に咀嚼し「もんじゅ」で総復習を行うという考えで進めます。

また、実験炉「常陽」での経験も踏まえた運転・保守支援技術の開発や稼働率向上のための研究開発を行っていきます。

**【スライド24】 A：最近の海外のトラブル経験（代表例）  
B：Blank**

まず、これまでの海外高速炉での経験の「もんじゅ」への反映について述べます。

最近の海外で発生した代表的な故障、事故には、英国の原型炉PFRでの蒸気発生器伝熱管水リーク事故、フランスの原型炉フェニックスでの2次ナトリウム系配管のクラック、それとスーパーフェニックス、最近ではプロトタイプと呼ばれていますが、炉外燃料貯蔵槽でのナトリウム漏えいや1次ナトリウム系への空気混入などのトラブルがありました。

**【スライド25】 A：PFRの蒸気発生器水リーク事故の原因  
B：仕切板の隙間からのNaリーク流**

ここでは、PFRの蒸気発生器水リーク事故の経験に対し「もんじゅ」においてどのように対応したかを採り上げます。

PFRでは、1987年に大規模な水リーク事故が発生しましたが、その原因を模式的に示します。

事故の発生とそれが拡大した原因としては、次の3点があります。

一つは、右に示すように、蒸気発生器内の内筒の縦方向の継ぎ目が不完全で、そこから漏れたナトリウムが伝熱管を振動させていたこと、二つ目は、ナトリウム-水反応を検知する水素計が故障したまま運転されていたこと、三つ目は、この蒸気発生器には蒸気の急速排出系が設置されていなかったことです。

【スライド26】 A：PFRの蒸気発生器水リーク事故の原因  
B：「もんじゅ」蒸気発生器の水漏洩検出系と急速排出系

右のスライドに示す「もんじゅ」の蒸気発生器では、仕切構造は溶接されており、隙間が無い構造であります。

水素計は当初から自動停止系に接続されており、水素濃度が監視できない状態では運転できないようにシステムが設計されています。

また当初から、全ての蒸気発生器に急速排出系が設置されています。

さらに、溶接法自体が適切であったか、水素計や急速排出系を含めた大洗工学センターでの開発試験はどうであったかまで遡って改めて評価を行い、万全をきしています。

【スライド27】 A：「もんじゅ」可視化ツールによるプラント状態表示  
B：「もんじゅ」による運転・保守支援技術の開発】

次に、「もんじゅ」による運転・保守支援技術の開発では、プラントの異常診断システムの開発や、シミュレータを用いたヒューマンエラーの影響について検討を進めています。

左のスライドは、プラントの運転を容易なものとするべく、プラントデータをオンラインで収集・評価し、運転員・保守員に複雑なプラント状態を一つの視野に入るコンパクトな形で、分かりやすく表示するシステムを示しています。

また、「もんじゅ」では信頼性評価として、確率論的な手法を用いて、重要機器の運転・保守の改良により信頼性の向上を図っていきます。さらに、運転中の「もんじゅ」を対象としたリビングPSA確率論的安全評価の適用研究を進め、機器の故障や補修作業中においてもプラント全体の信頼性確保に対するガイドを与えてくれるようにして行きます。

【スライド28】 A：「もんじゅ」による稼働率向上のための研究開発  
B：Blank

高速炉の計画外停止の発生頻度と稼働率を軽水炉並にするため、「もんじゅ」の稼働率向上の研究開発を進めています。

運転サイクルの長期化を図るため、燃焼反応度が小さな炉心の構築や、ナトリウムボンド型の長寿命制御棒の開発に取り組んでいます。

燃料交換や定期点検の期間を短縮するため、「常陽」での経験をベースとして、燃料交換機の高度の自動化や、ISI技術の高度化、ロボット等による遠隔保守技術の開発、さらに、腐食生成物の除去による被ばくの低減化等を手がけています。

計画外停止の予防には、信頼性向上の研究が活かされる他、プラント状態



や機器健全性の監視を行う検知技術や予防保全の技術の開発が重要となります。

【スライド29】 A：海外研究者の招聘

B：「もんじゅ」での外国人研究者との交流風景

今や高速炉の運転経験という点では、海外で運転されている高速炉が極めて限られたものになっています。「もんじゅ」を国際的に開かれた研究開発の場として整備を図っていきます。

海外の高速炉のこれまでの運転経験に照らして「もんじゅ」技術を評価し、「もんじゅ」の運転に万全をきすとともに、さらに経済性・信頼性向上に向けた研究開発を進めていきます。

昨年度から「もんじゅ」に国際特別研究員6名を欧米より招聘し、研究開発に取り組んでおります。

また、協力協定により、欧州から3名が駐在している他、動燃からもフェニックスに2名が駐在して双方の活発な交流により技術の幅を広げています。

以上、経済性があり、安心できる高速炉自体の開発の取り組みを述べてまいりました。

報告の最後に、第一部、第二部合わせてまとめをしてみます。

【スライド30】 A：まとめ (1/2)

B：高速炉による核燃料リサイクルの経済性評価

我が国が実用化を目指している現行のMOX燃料、ピューレクス法再処理の高速炉リサイクルシステムについて、高速炉と核燃料サイクルから、信頼性・経済性向上に向けた革新技術の導入について分析してきました。

その結果、これまで提起した研究開発課題の解決により、

【スライド31】 A：まとめ (1/2)

B：将来プラントの発電コストの目標値と評価値

2030年頃の将来プラントでは、発電コストにおいて軽水炉に十分競合できる高速炉リサイクルシステムを構築できる見通しを得ることができました。

今後の研究開発は、信頼性・安全性・経済性の向上等、実用化に繋がる革新的な課題に対し着実に推進していくことが基本となります。

【スライド32】 A：まとめ (1/2)

B：まとめ (2/2)

また、研究開発の節目では、成果の集約、体系化として技術の実証が重要となります。

燃料製造としては、プルトニウム燃料第3開発室を、再処理技術ではリサイクル機器試験施設RETF等を活用して実証を行っていきます。

高速炉については、「もんじゅ」の炉心及びプラントを用いた技術開発を通して次の実証炉への反映を進めていきます。

「もんじゅ」技術の評価では、「常陽」のMK-IIIのように、「もんじゅ」の出力28万kWeを2倍にするにはどうすればよいかという問題設定も考えています。それによって高い精度の設計裕度の評価、あるいは新しい材料の開発等の課題を明確にし易くできると思います。

終わりにあたり、研究開発の今後の取り組み姿勢について、3点述べてみたいと思います。

一つは、高速炉と核燃料サイクルとの有機的な連携です。

高速炉リサイクルシステムが社会に受容されるには、信頼性・経済性はもとより、環境保全型自立エネルギーシステムとして理想的なリサイクルの成立可能性を有する貴重な技術として仕上げていくことです。

とりわけ、地球環境にやさしく戻すといった環境保全と、核拡散抵抗性に柔軟に対応できる技術であることが重要であります。

人類がつくりだしたプルトニウムを自らコントロールし易くしていくには、高速炉と核燃料サイクルで調和のとれたリサイクルシステムとして研究開発を行うことが不可欠となります。

二つ目は、建設・運転主体と研究開発とが一体となって実用化の目標及び課題を共有化して効率的な展開が図られるようにすることです。

今年の新しい長計では、「もんじゅ」の取り替え燃料と実証炉の燃料とは仕様を総合的に検討するよう求めており、「もんじゅ」の炉心から実証炉の炉心へと連続的な技術の流れをつくり一体の開発が行えるよう計画を進めています。

三つ目は、研究開発の進展に伴い、適宜、経済性評価をはじめとしたチェックアンドレビューが必要となります。

今後の研究開発は、海外でも例がなく挑戦的なものです。冷静な見直し評価で軌道を確認、あるいは修正していくこととなります。

以上のような取り組みによって、説得力のある魅力ある高速炉リサイクルシステムの構築とその実現に向けて研究開発を積極的に進めていく所存であります。

今後とも、各界、各位のご理解、ご指導を賜りますようお願いいたします、私の報告を終わらせていただきます。

ご静聴ありがとうございました。

**信頼性・経済性を目指した  
核燃料リサイクル技術の開発  
— 高速炉の研究開発課題 —**

**動力炉開発推進本部  
副本部長 柳沢 務**

1. 高速炉の経済性・信頼性目標
2. 高速炉の経済性見通し
3. 実用化に向けた研究開発課題
  - (1) 経済性の向上
  - (2) 信頼性・安全性の向上
4. まとめ

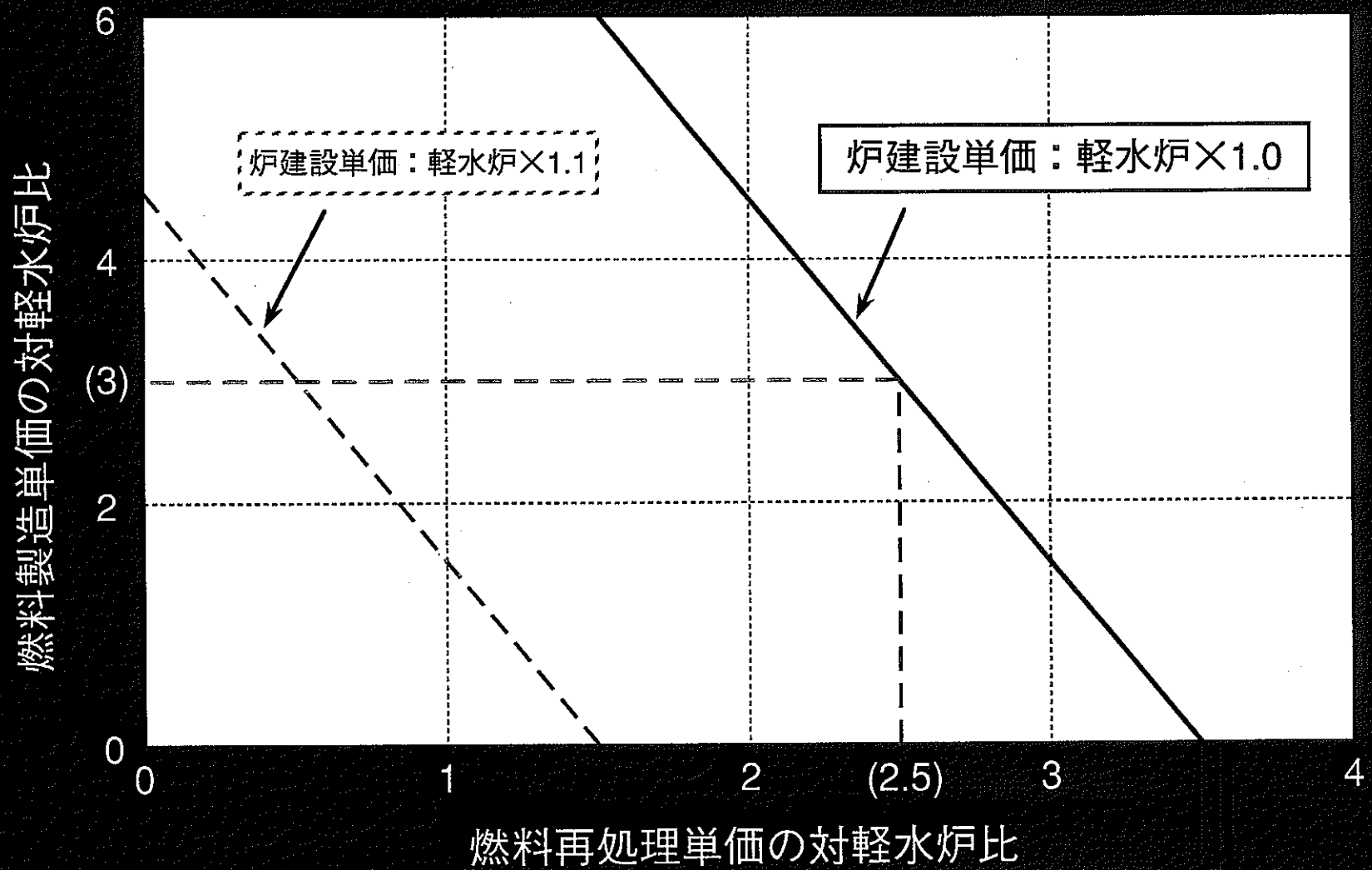
## 高速炉の経済性・信頼性目標

### 経済性目標：

- (1) 発電コストを軽水炉以下
- (2) 建設単価(初号機)を軽水炉以下

### 信頼性・安全性目標：

- (1) 安心感の持てるプラント
- (2) 計画外停止の発生頻度及び稼働率を軽水炉並に

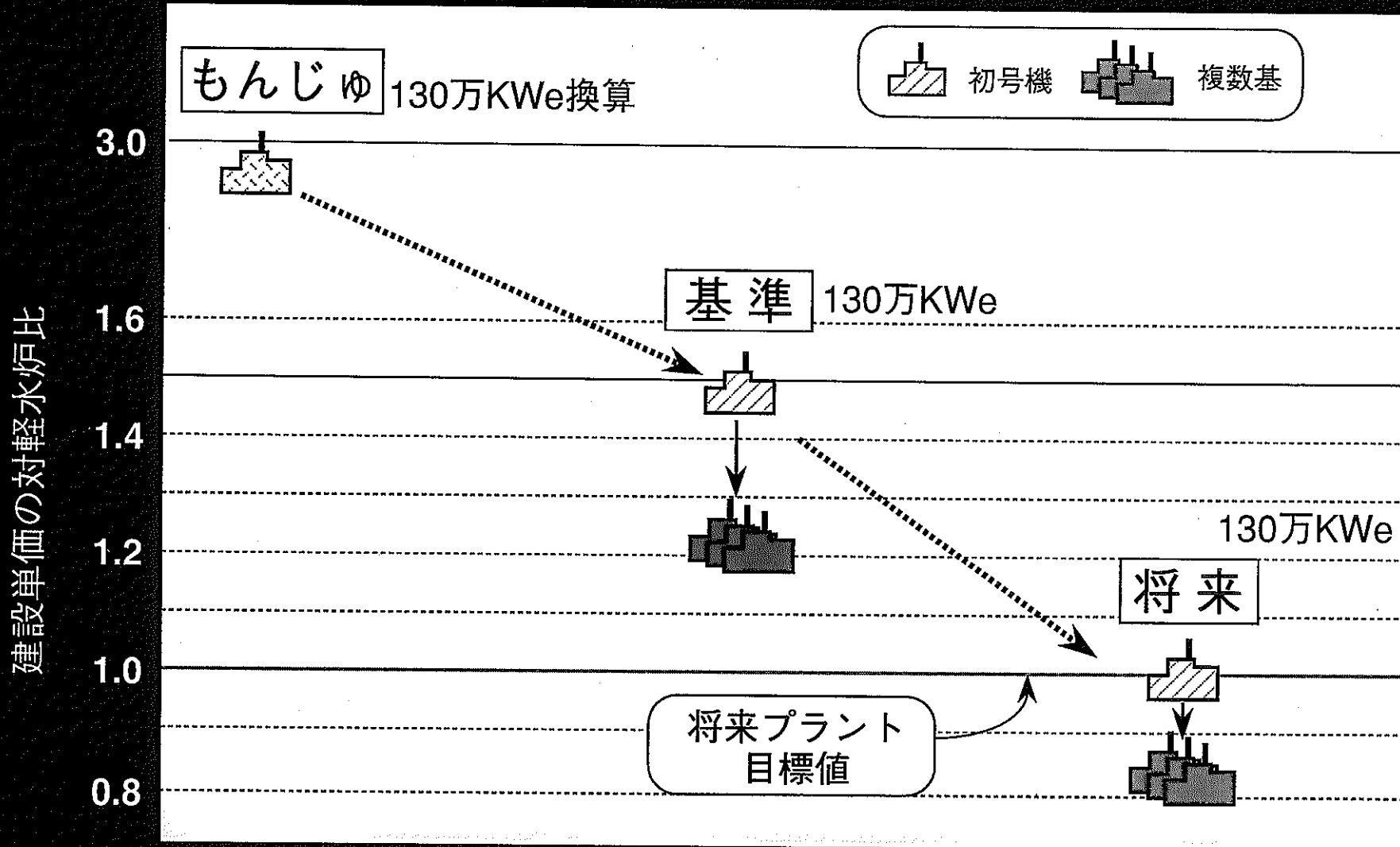


高速炉による核燃料リサイクルの経済性目標

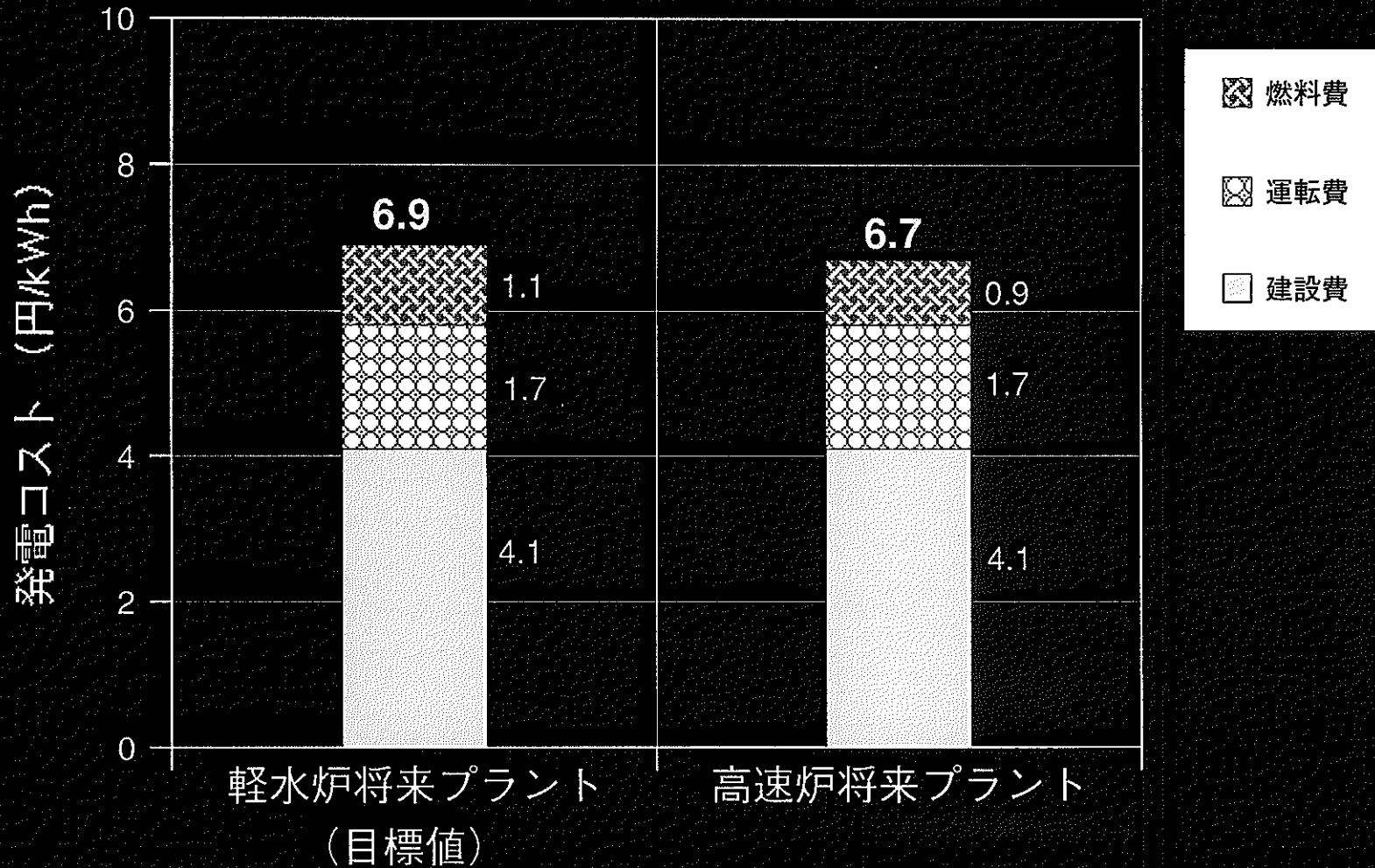
# 高速炉による核燃料リサイクルの 経済性評価

	<u>目標(軽水炉比)</u>	<u>評価値(将来プラント)</u>
炉建設単価：	同等以下	1.0~0.8
炉稼働率：	85%以上	同左
燃焼度：	15万MWd/t以上	同左
燃料製造単価：	3倍以下	2.6
再処理単価：	2.5倍以下	2.0
	↓	
発電コスト：	6.9円/kWh以下	6.7円/kWh

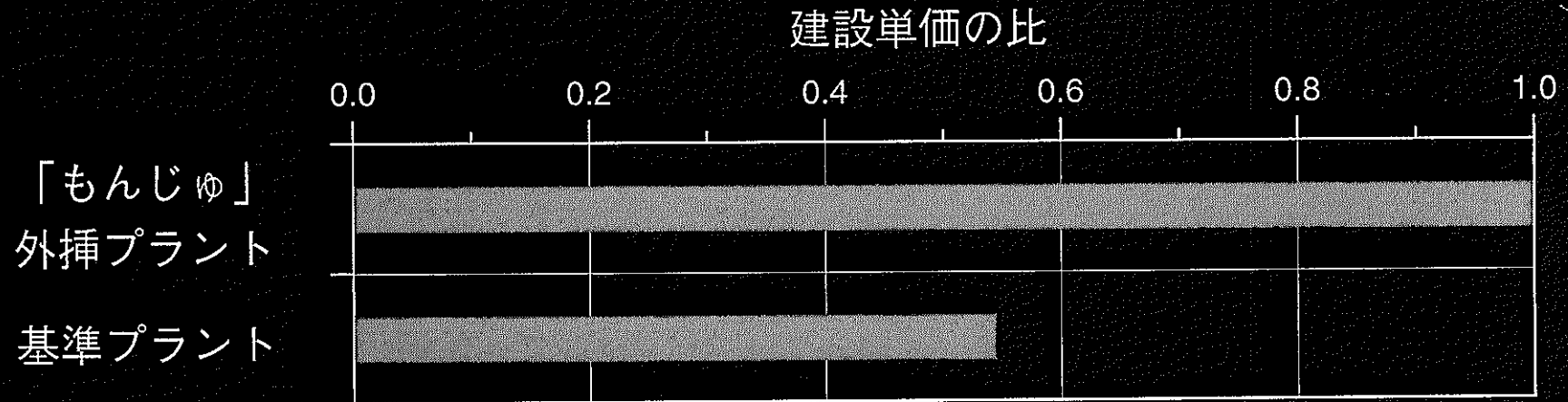




# 高速炉実用化までの建設単価推移



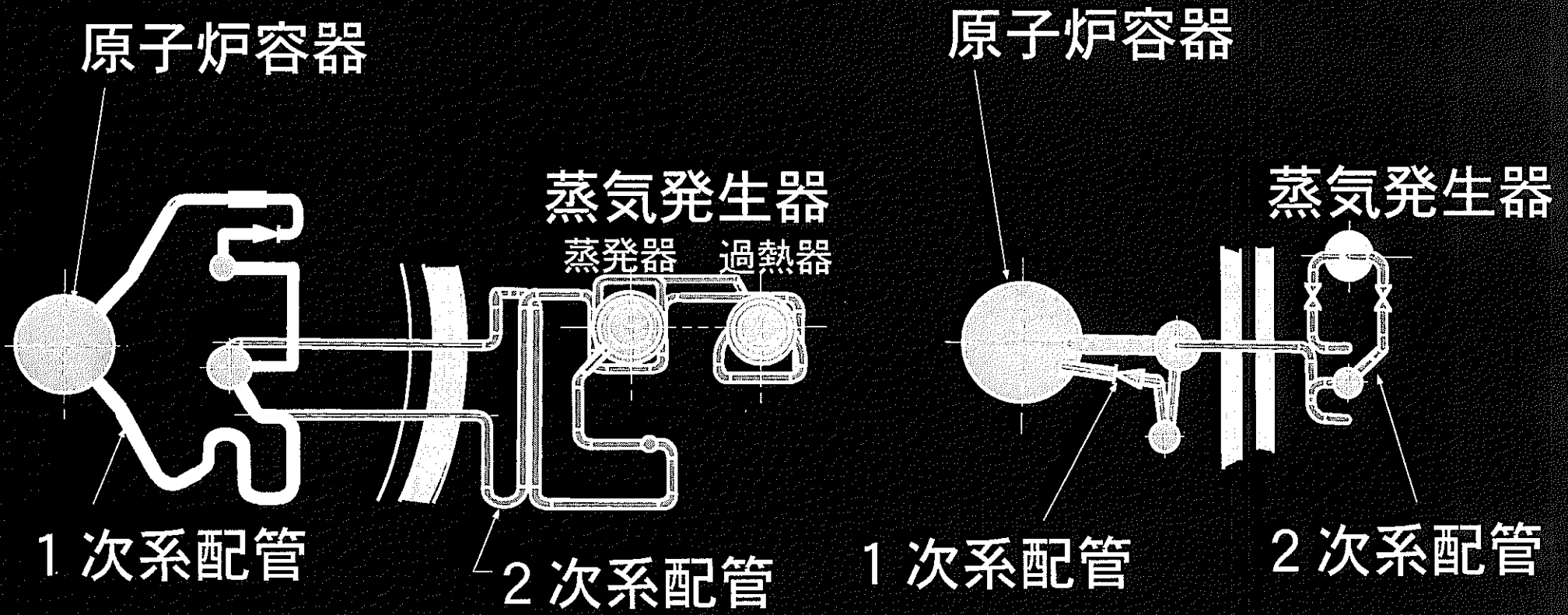
将来プラントの発電コストの目標値と評価値



### 建設単価低減の要因

原子炉構造、冷却系等の簡素化		: 13%
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 炉心上部機構引抜燃料交換、オーバーフロー系削除</li> <li>・ 配管短縮化（上部流出入配管方式、SG分散配置）</li> <li>・ 管内1次流IHX、ガードベッセル共用、一体貫流型SGの採用</li> <li>・ 乾式使用済燃料貯蔵、等</li> </ul>		
配置等の合理化	（格納容器縮小化等）	: 17%
間接費の低減	（建設工期の短縮、試験費削減）	: 15%

「もんじゅ」から基準プラントへの建設単価低減

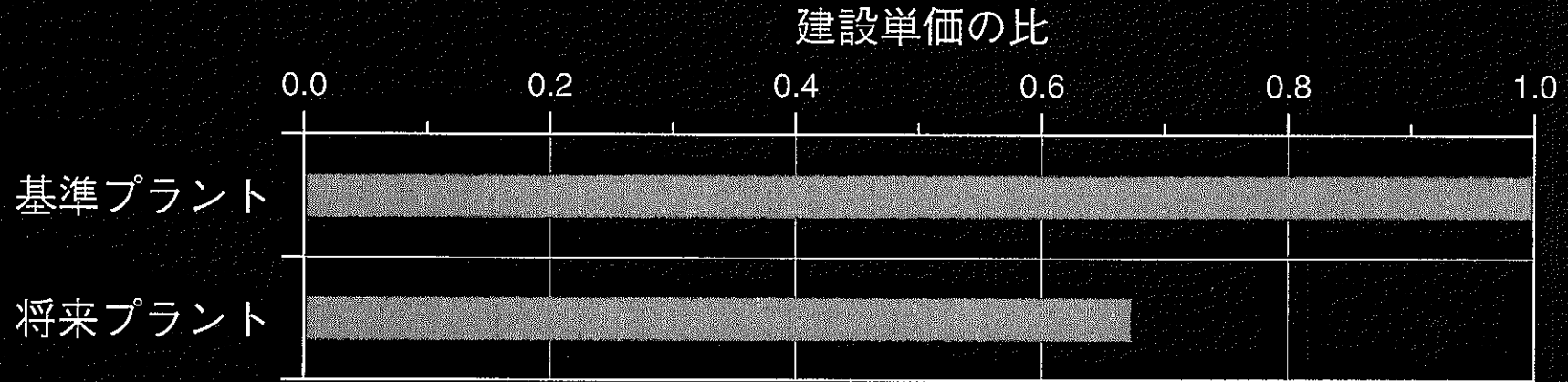


原型炉「もんじゅ」  
(28万kWe)



大型炉設計研究  
(約60万kWe)

# 配管の短縮化



### 建設単価低減の要因

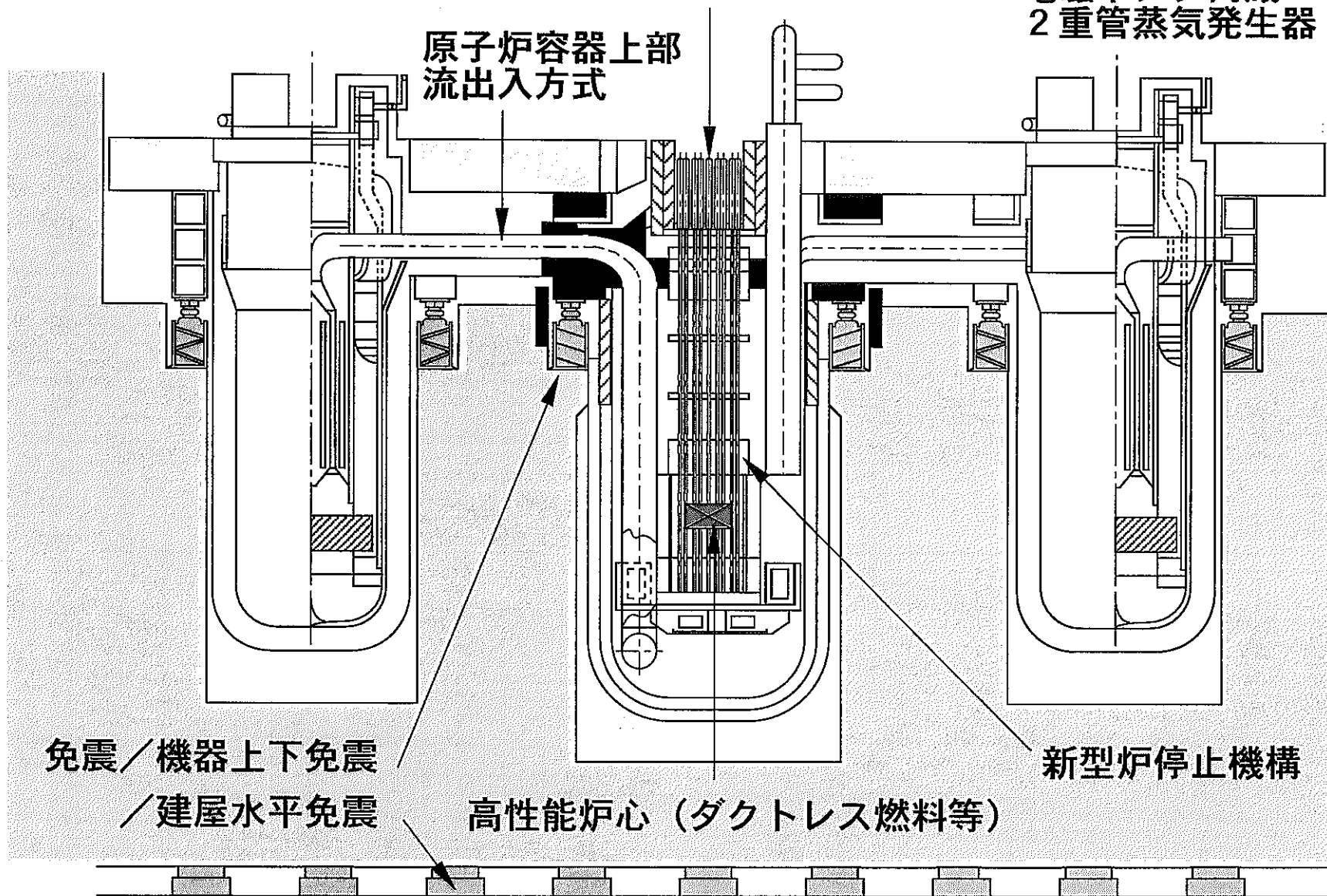
炉心の高性能化 (炉心コンパクト化)	}	: 15%
原子炉構造、冷却系の簡素化 (2次Na系削除、3次元免震、機器合体)		
高速炉特有設備の簡素化 (ライナー設備の合理化等)		: 2%
高温・高熱効率化による設備合理化 (タービン系等)		: 1%
配置等の合理化 (原子炉補助建物縮小化等)		: 5%
間接費の低減 (建設工期の短縮等)		: 10%

基準プラントから将来プラントへの建設単価低減

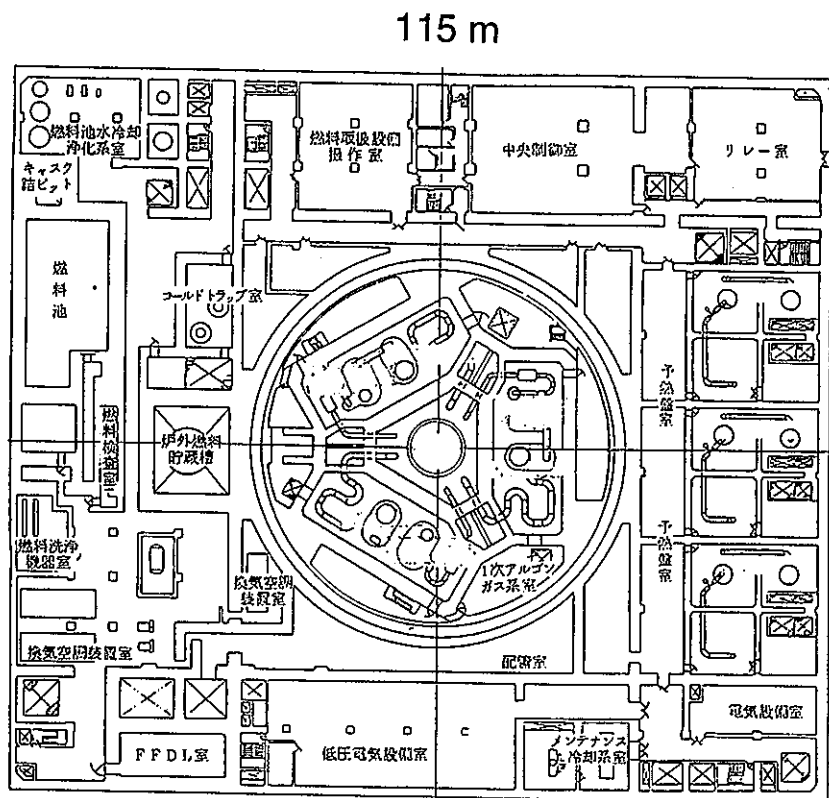
上部引抜き型炉心上部機構

電磁ポンプ内蔵  
2重管蒸気発生器

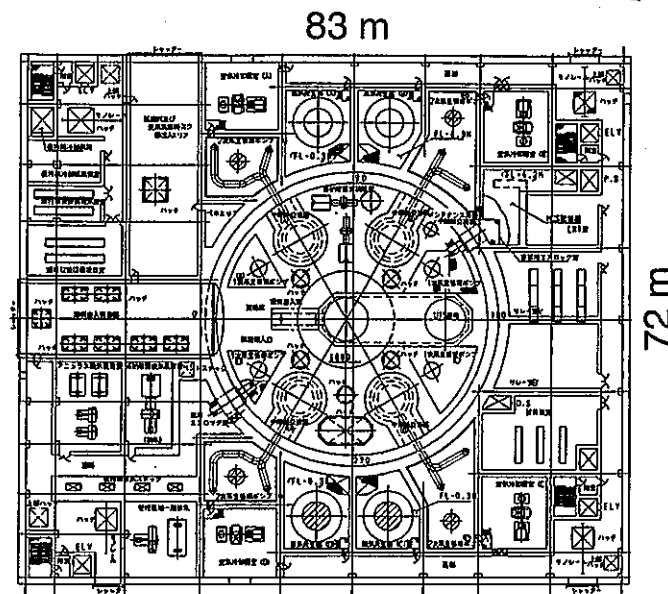
原子炉容器上部  
流出入方式



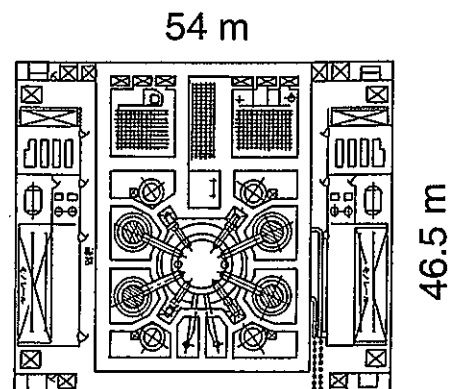
将来プラント概念



「もんじゅ」(28万kWe)

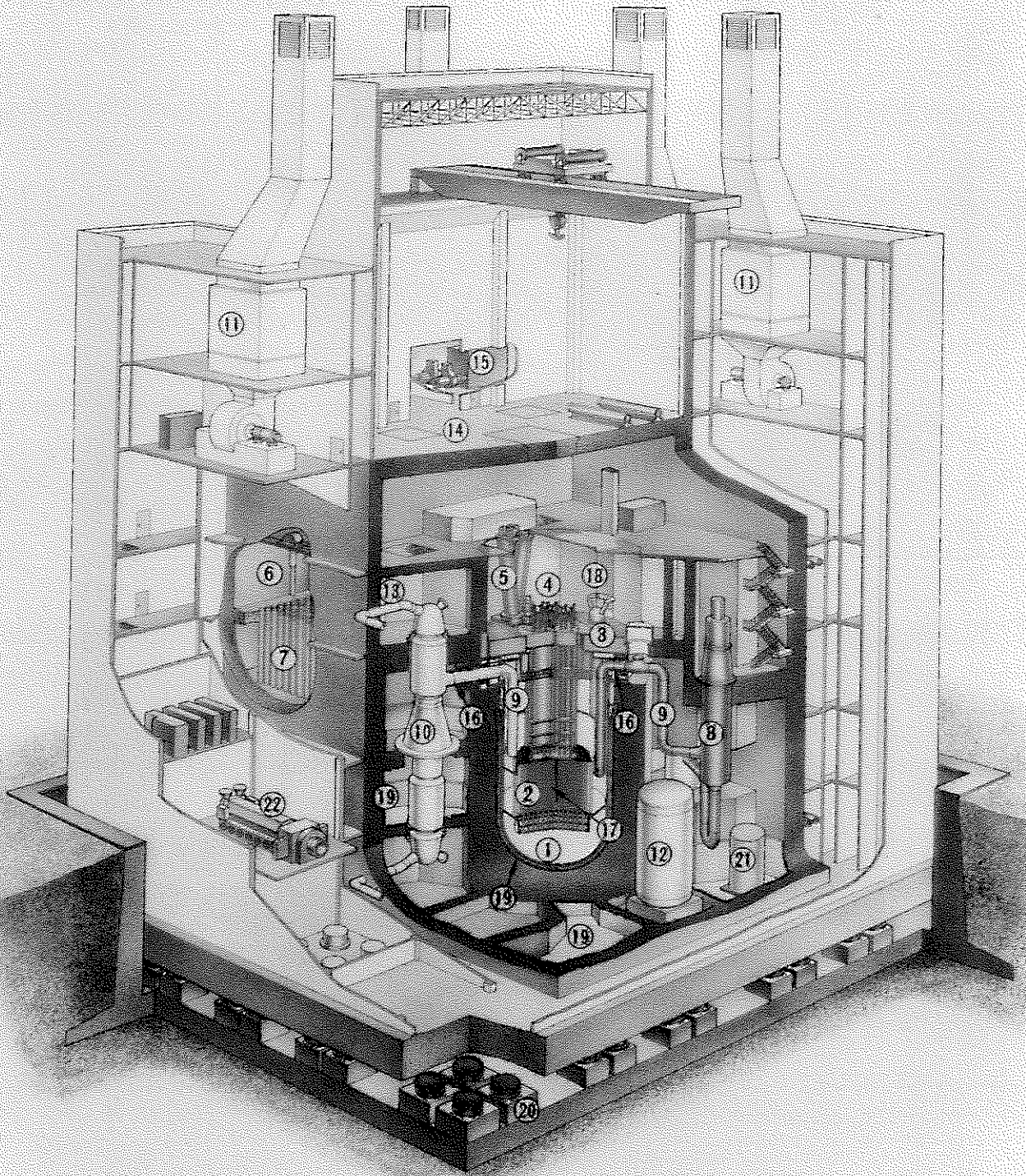


基準プラント (130万kWe)



将来プラント (130万kWe)

# 原子炉建屋形状の比較



# 将来プラント概念



1. 高速炉の経済性・信頼性目標
2. 高速炉の経済性見通し
3. 実用化に向けた研究開発課題
  - (1) 経済性の向上
  - (2) 信頼性・安全性の向上
4. まとめ

# 経済性向上のための主要な 研究開発課題

－ 将来プラントに向けて －

- ・ 炉心の高性能化
- ・ 原子炉構造・冷却系の簡素化
  - － 2次ナトリウム系の削除
  - － 3次元免震構造の採用
  - － 機器の高度化（合体）

# 炉心の高性能化

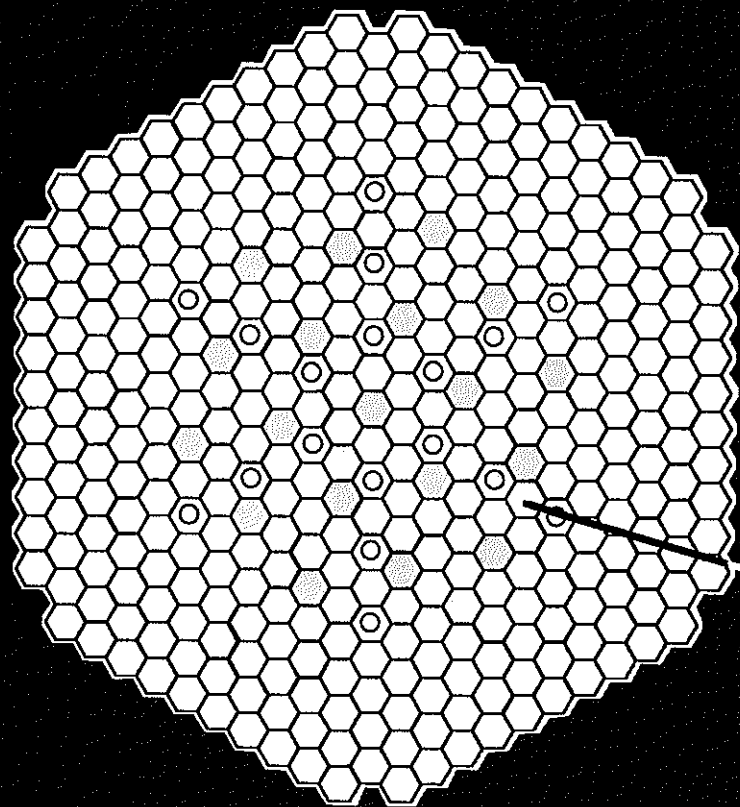
- 炉心のコンパクト化  
高線出力炉心、新材料遮へい体
- 運転サイクル長期化
- 高燃焼度燃料
- 軽量化燃料（ダクトレス、短尺）

# 「もんじゅ」高度化炉心の構築

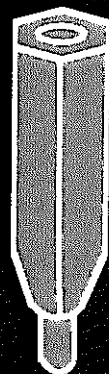
## 目的

FBR 実用化に向けた

- ・ 高燃焼度化
- ・ 運転サイクル期間の長期化

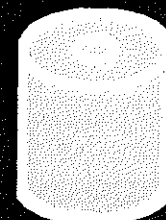


高度化炉心



127本集合体

中空ペレット



燃焼度[MWd/t]

(10万→12万→15万以上)

メカニカルホールドダウン  
コイルバネ

ハンドリングヘッド

上部パッド

上部遮蔽

中間パッド

燃料要素

グリッドスペーサ

下部遮蔽体

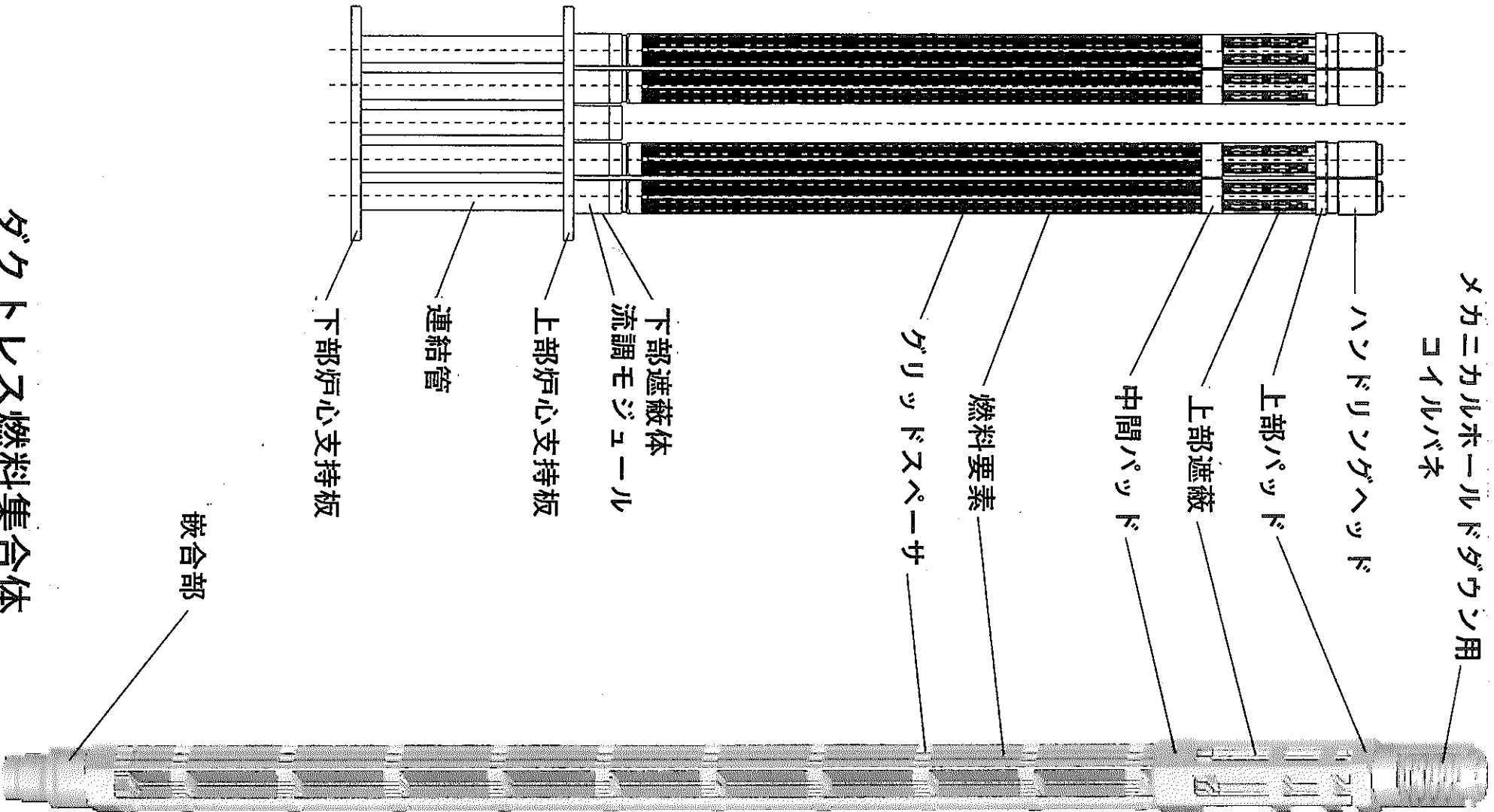
流調モジュール

上部炉心支持板

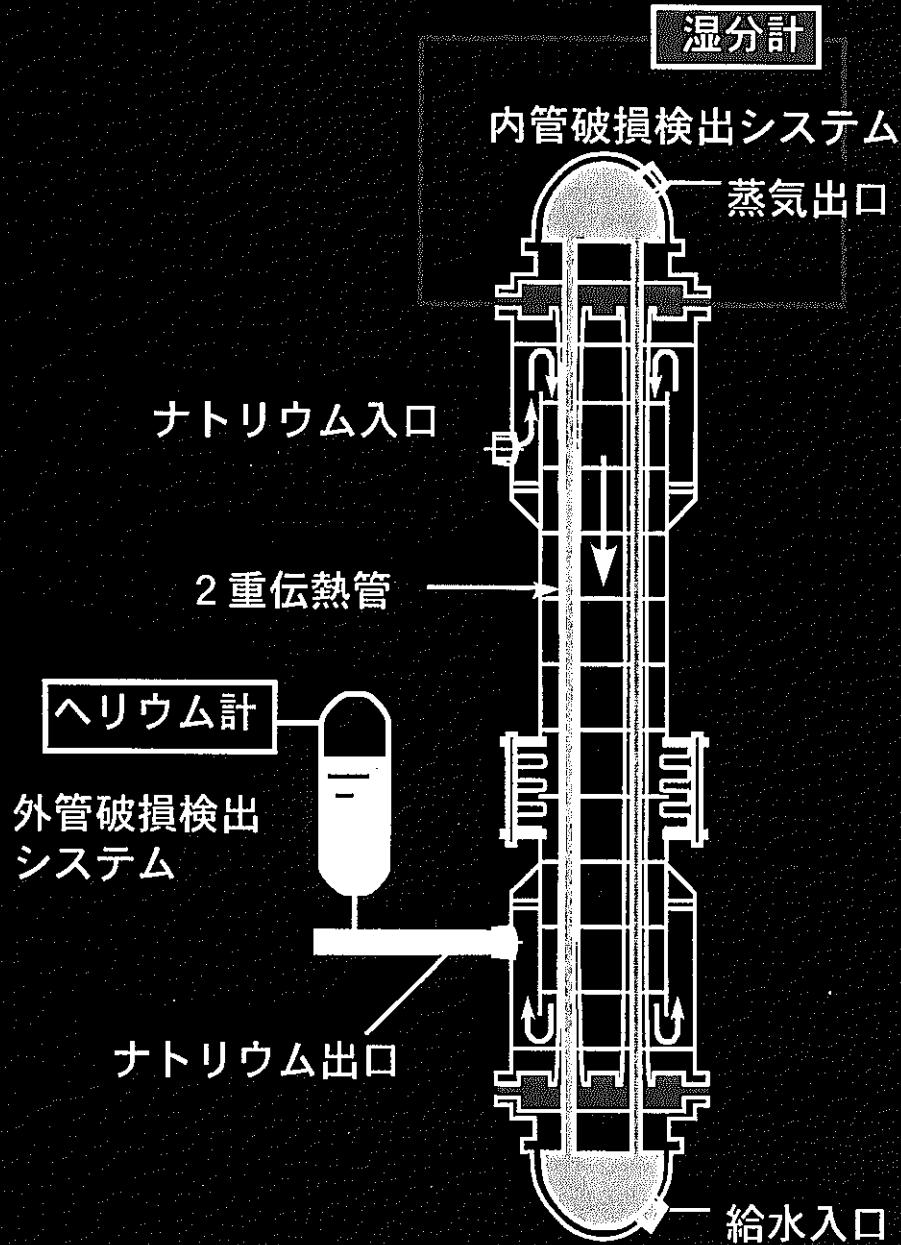
連結管

下部炉心支持板

嵌合部



ダクトレス燃料集合体



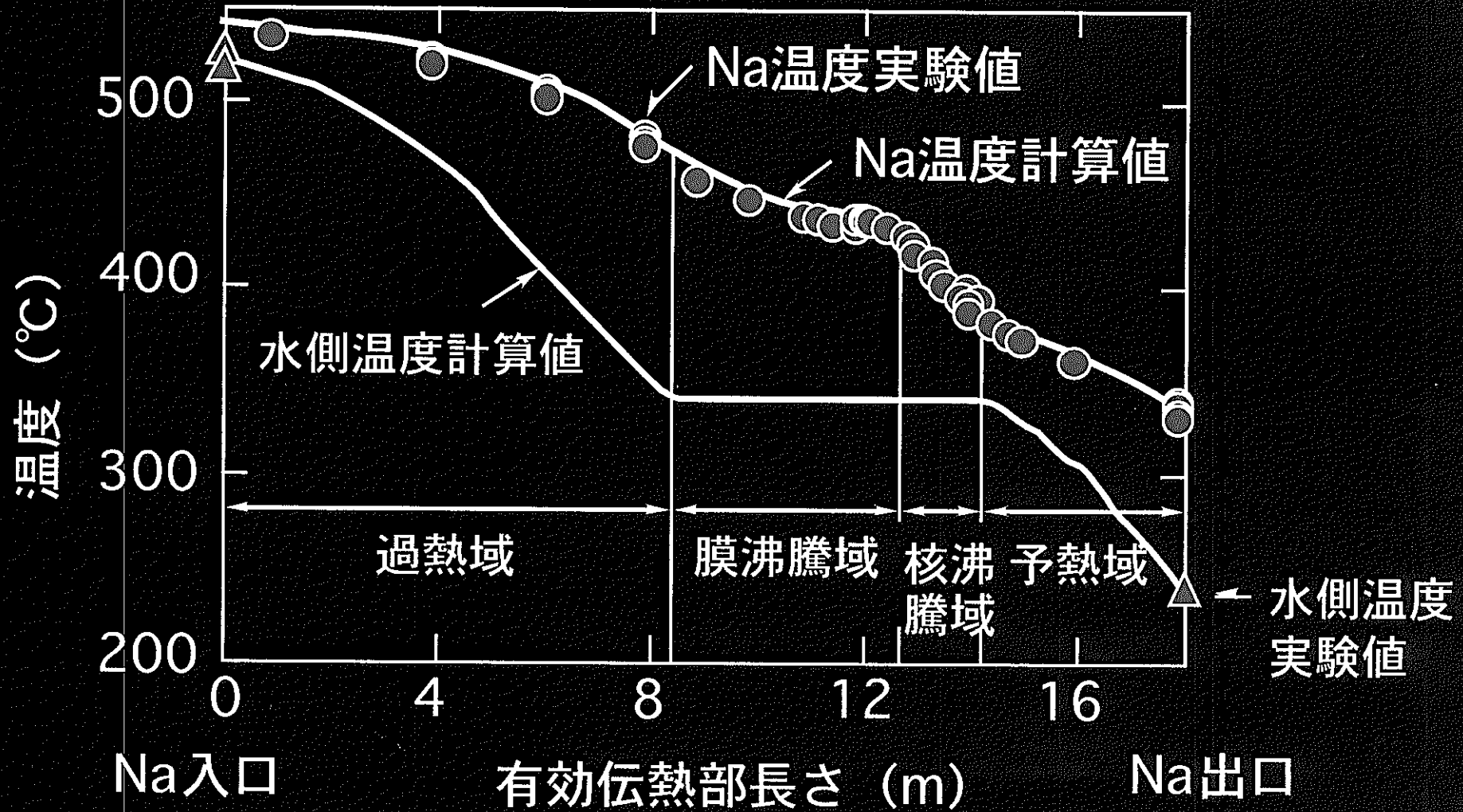
## 蒸気発生器基本性能

- ・ Na / 水伝熱流動特性評価
- ・ 水側流動不安定の評価
- ・ システム動特性評価

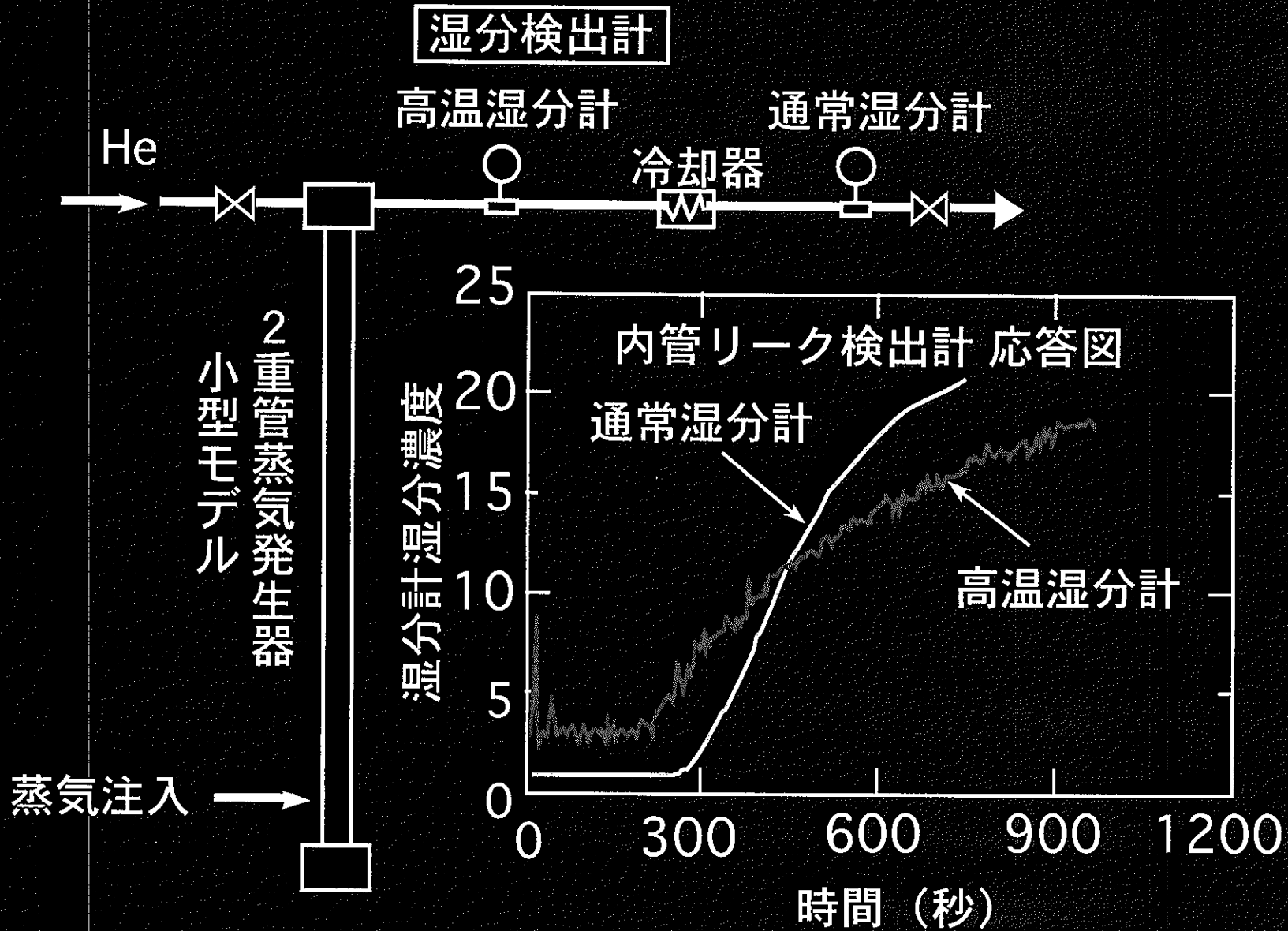
## 安全性、信頼性評価

- ・ 内外管リーク検出特性評価
- ・ DNB温度振動特性評価

# 2重管蒸気発生器の課題



# 小型2重管蒸気発生器の実験と解析の比較

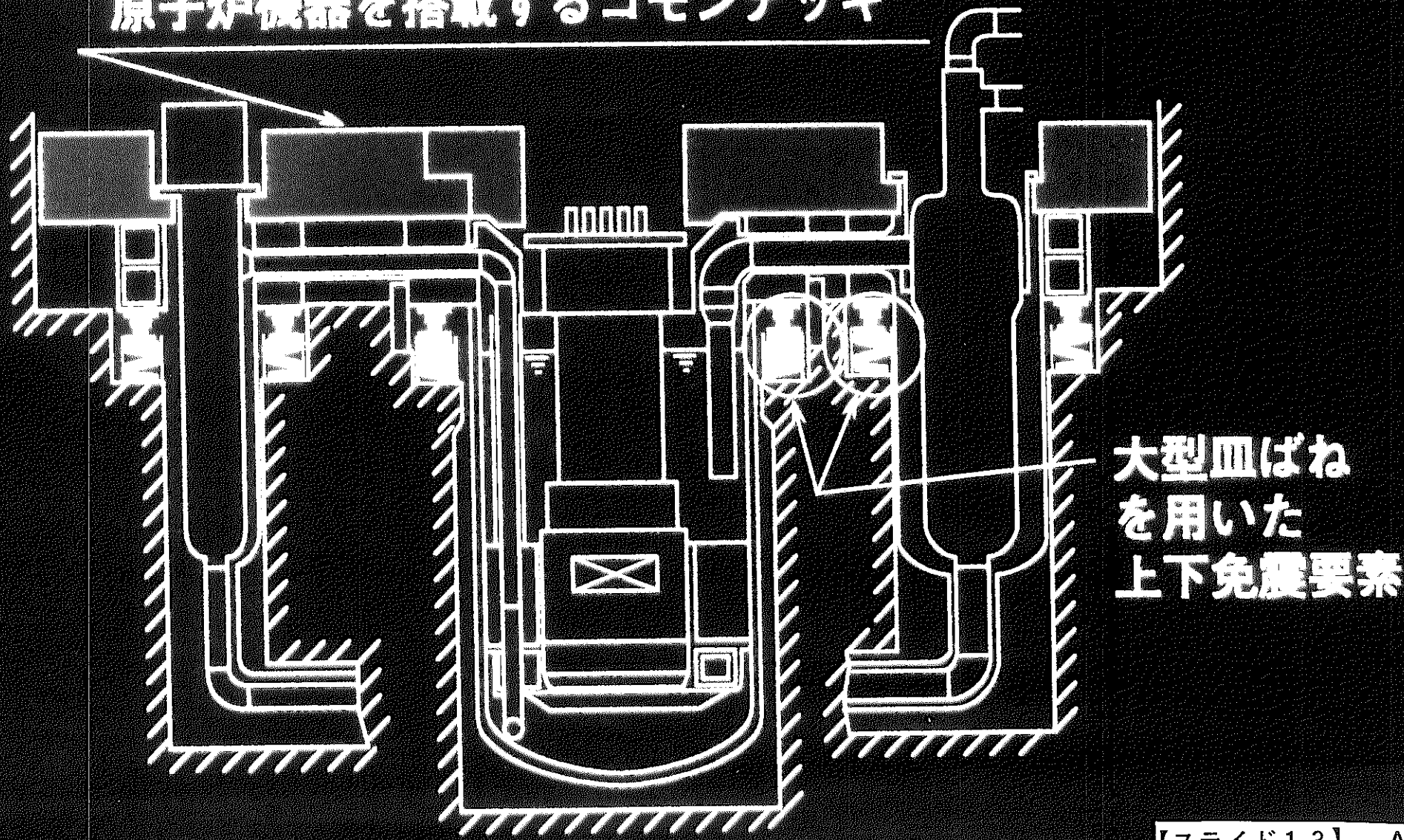


# 2重管蒸気発生器内管リーク検出試験



# 機器上下免震による地震荷重緩和

原子炉機器を搭載するコモンデッキ



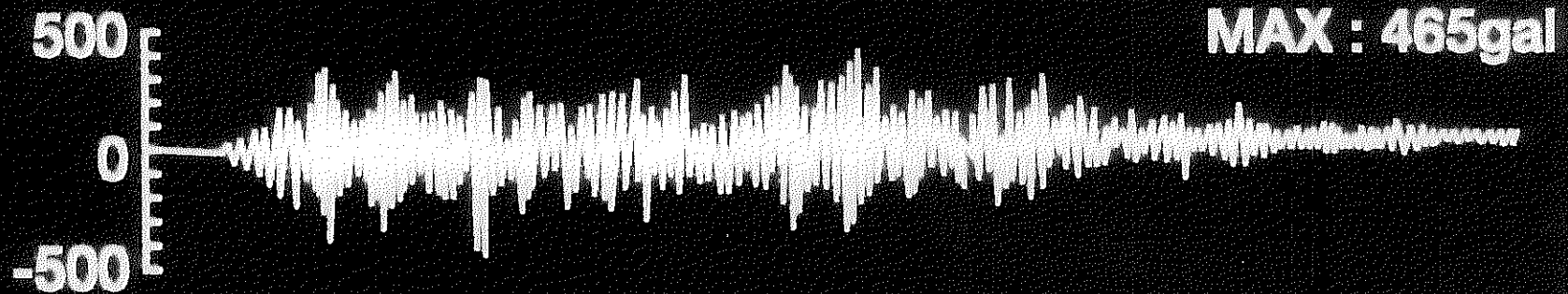
大型皿ばね  
を用いた  
上下免震要素

【スライド13】 A

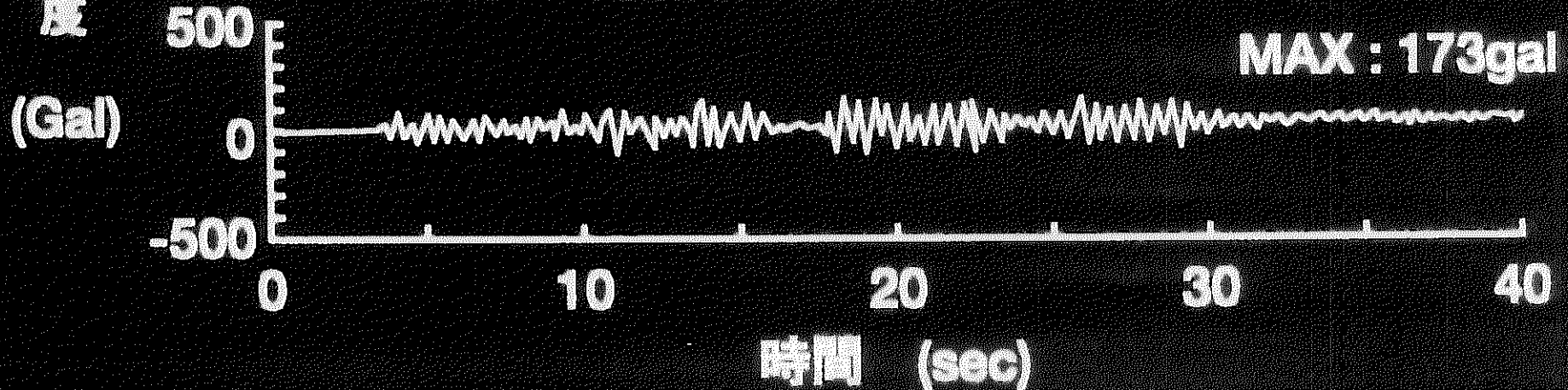
【スライド14】 A

# 大型皿ばねによる機器上下免震要素の効果

上下免震なしの場合



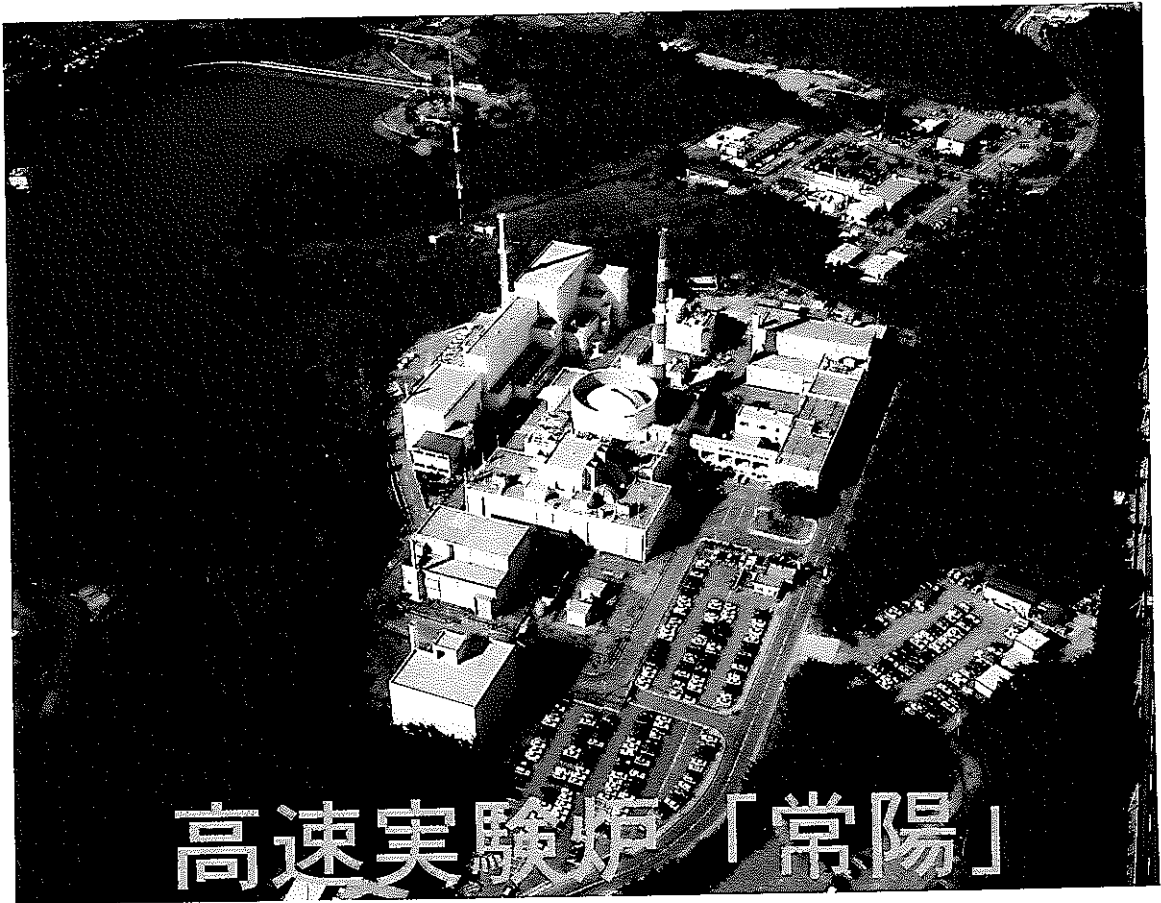
機器上下免震を加えた場合





コモンデッキ  
振動台

# コモンデッキ方式免震構造の振動試験



高速実験炉「常陽」

# 「常陽」改造（MK-III）計画 の概要

## ○熱出力の増加

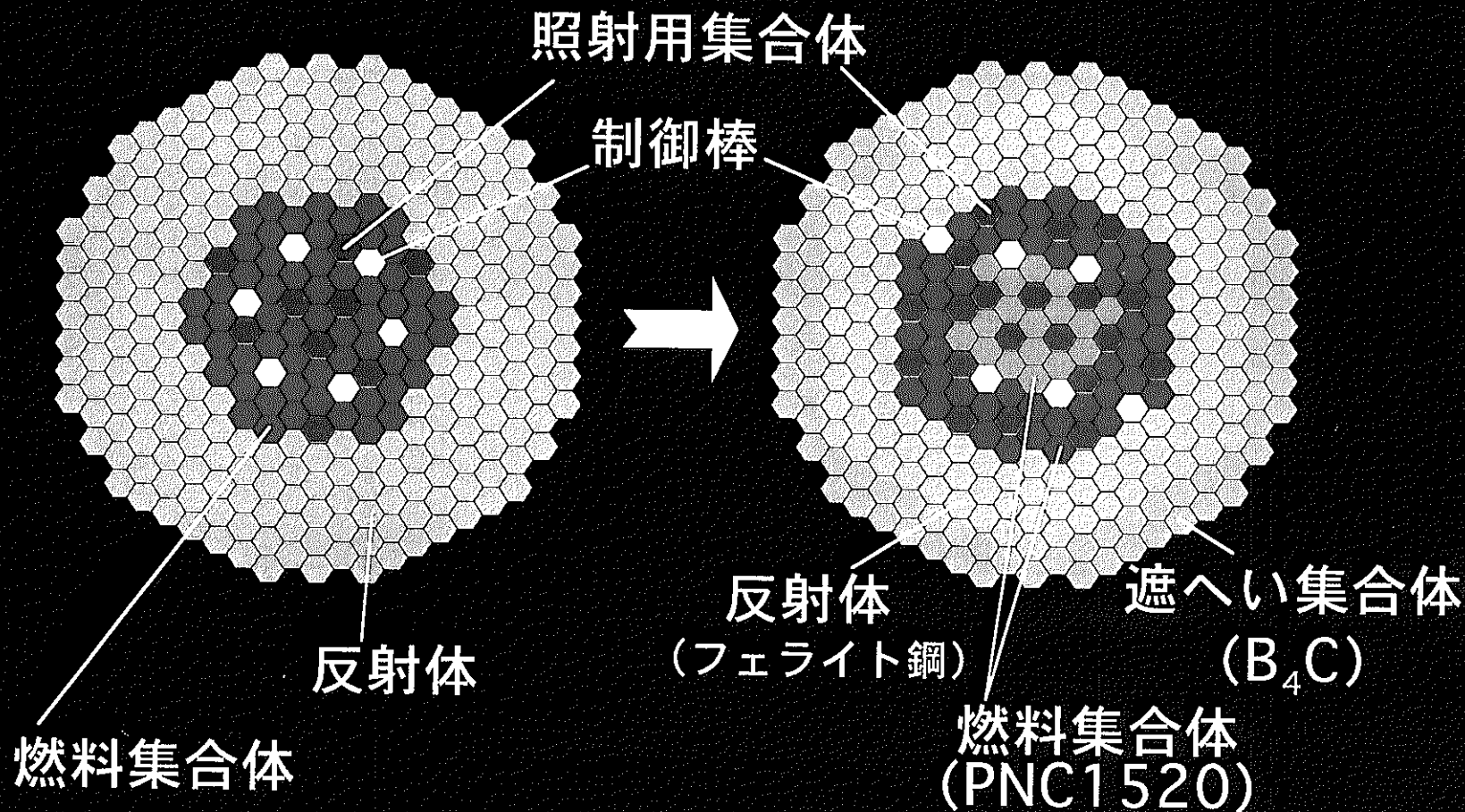
- ・ 100MW → 140 MW

## ○炉心の改造

- ・ 燃料体数の増加（67体→85体）
- ・ 制御棒移設による照射場拡大
- ・ 照射試験体数の増加（約9体→約20体）

# MK-II 炉心

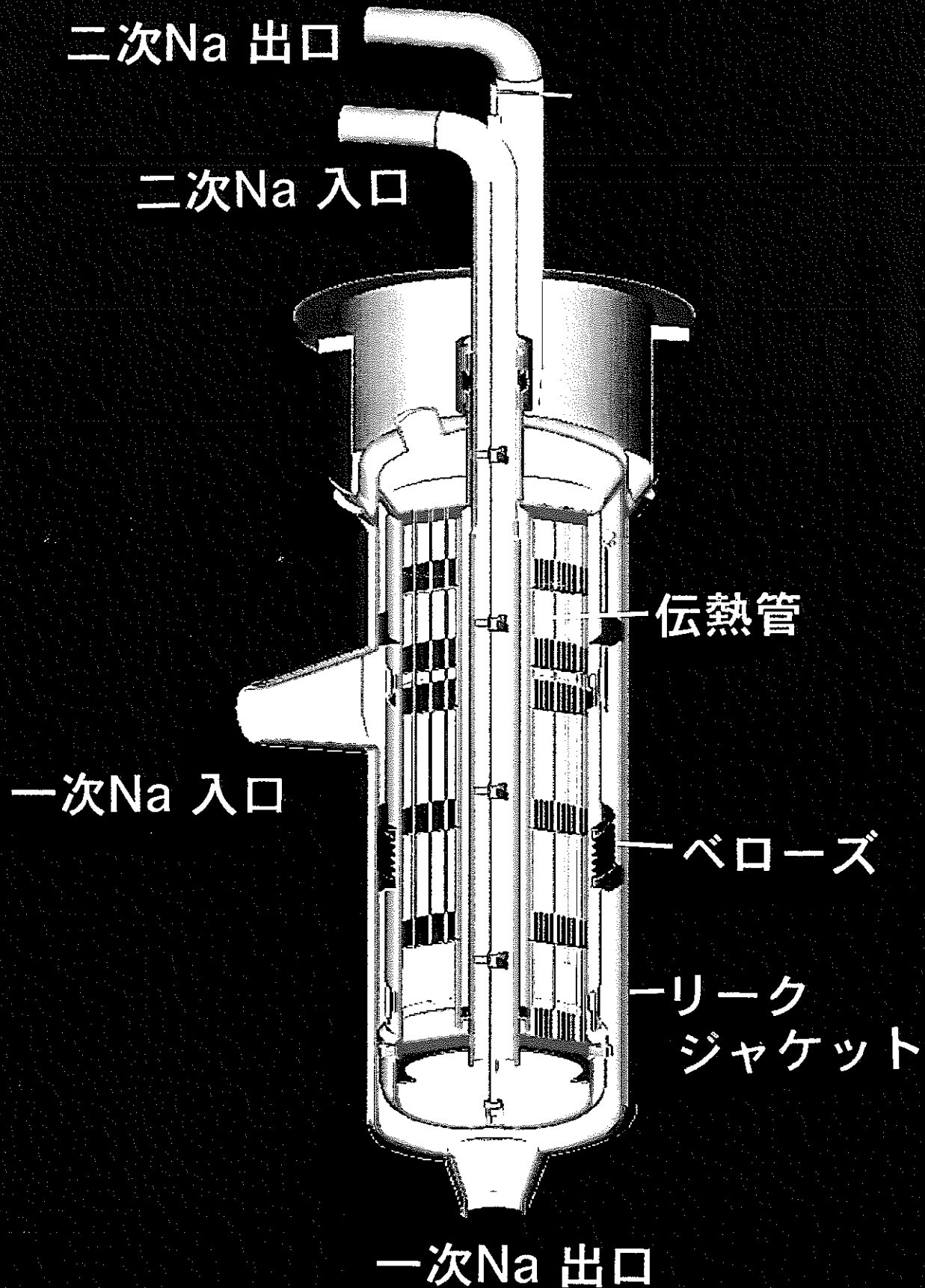
# MK-III 炉心



# 「常陽」炉心構成

# MK-III炉心における技術確証

- ・ 炉心構成要素部材へのPNC1520鋼の本格導入
  - 燃料の長寿命化（高燃焼度化）
  - 高出力化（プラントの高温化）
- ・  $B_4C$  遮へい集合体の導入
  - 遮へい性能の向上
  - 炉容器の小型化
- ・ 反射体部材へのフェライト鋼の採用
  - 炉心構成要素の長寿命化



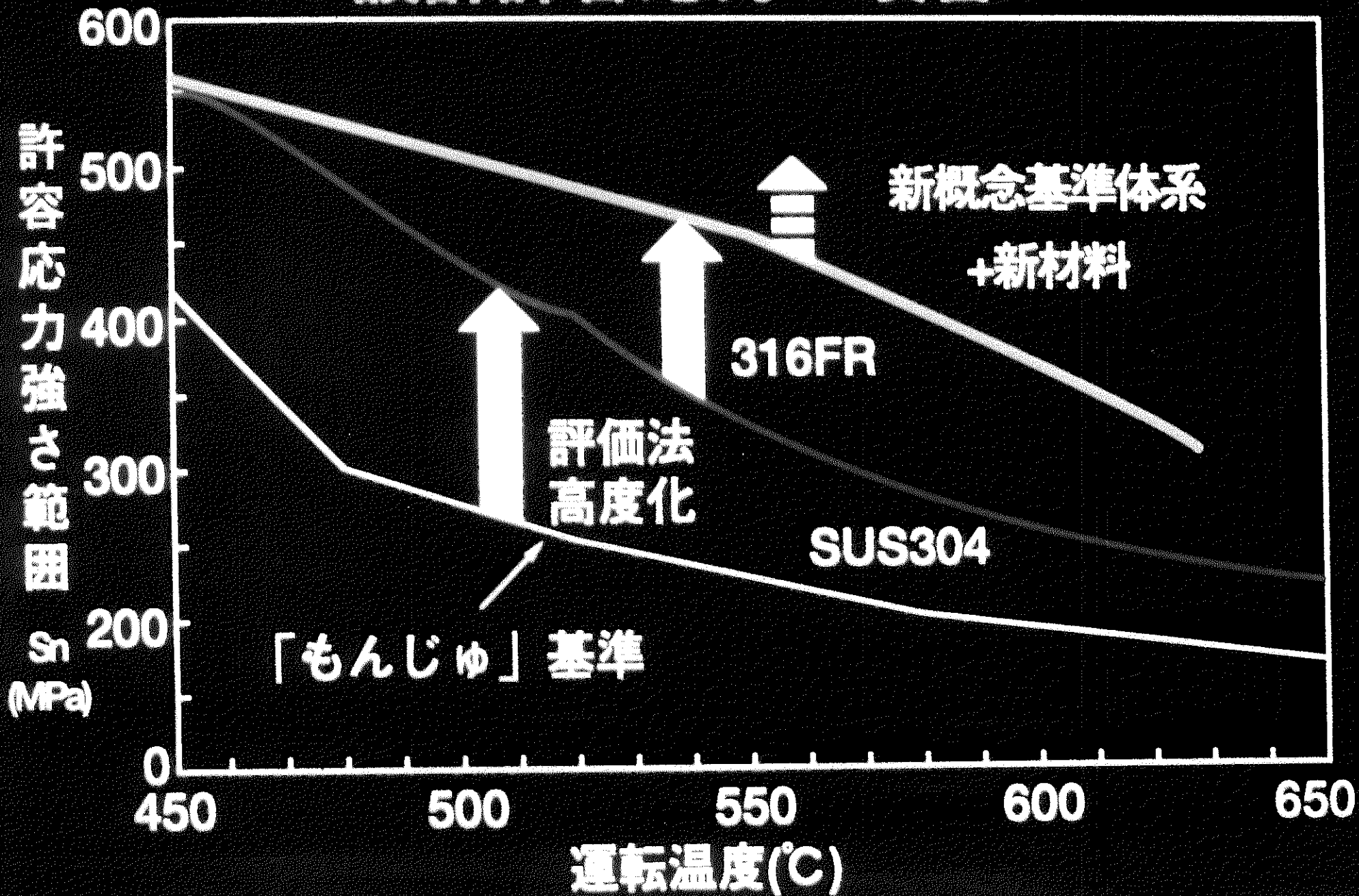
「常陽」MK-III主中間熱交換器



# MK-III 主 IHX の高度化

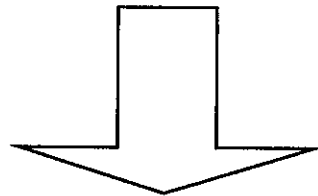
- 流量の増大：22%増
- 出入口温度差の増大：  
130°C→150°C
- 新材料の採用：316FR鋼

# 設計許容応力の改善



# MK-III主 IHX への新材料の採用

- ・ 316 FR 鋼の特徴→高温クリープ特性向上
- ・ 316 FR 鋼採用による合理化・改良のポイント
  - －熱遮へい板（ノズル部、管板部）削除
  - －管板形状単純化
  - －高応力発生部の短尺化、単純化



同一寸法で除熱性能 40 % 向上を達成

# 安全性向上のための 研究開発課題

## 炉心安全性の向上

### 安心感のある炉心

- ・ 炉心損傷事象評価の高度化  
再臨界の排除
- ・ 受動的な安全機能の強化

# 仮想的炉心損傷に関する安全研究

## 炉内安全性試験

仏国

SCARABEE 炉  
CABRI 炉

動燃

炉内安全性試験炉  
(検討中)

## 炉外安全性試験

動燃

## 安全評価技術の高度化

- ・ 起因過程 : SAS4A
- ・ 炉心崩壊過程 : SIMMER-III
- ・ 事故後崩壊熱除去
- ・ 実験データベース

## 実用化目標

再臨界の排除  
事象推移の原子炉容器内終息

# 受動的的安全性の追及

## ● 受動的な炉停止

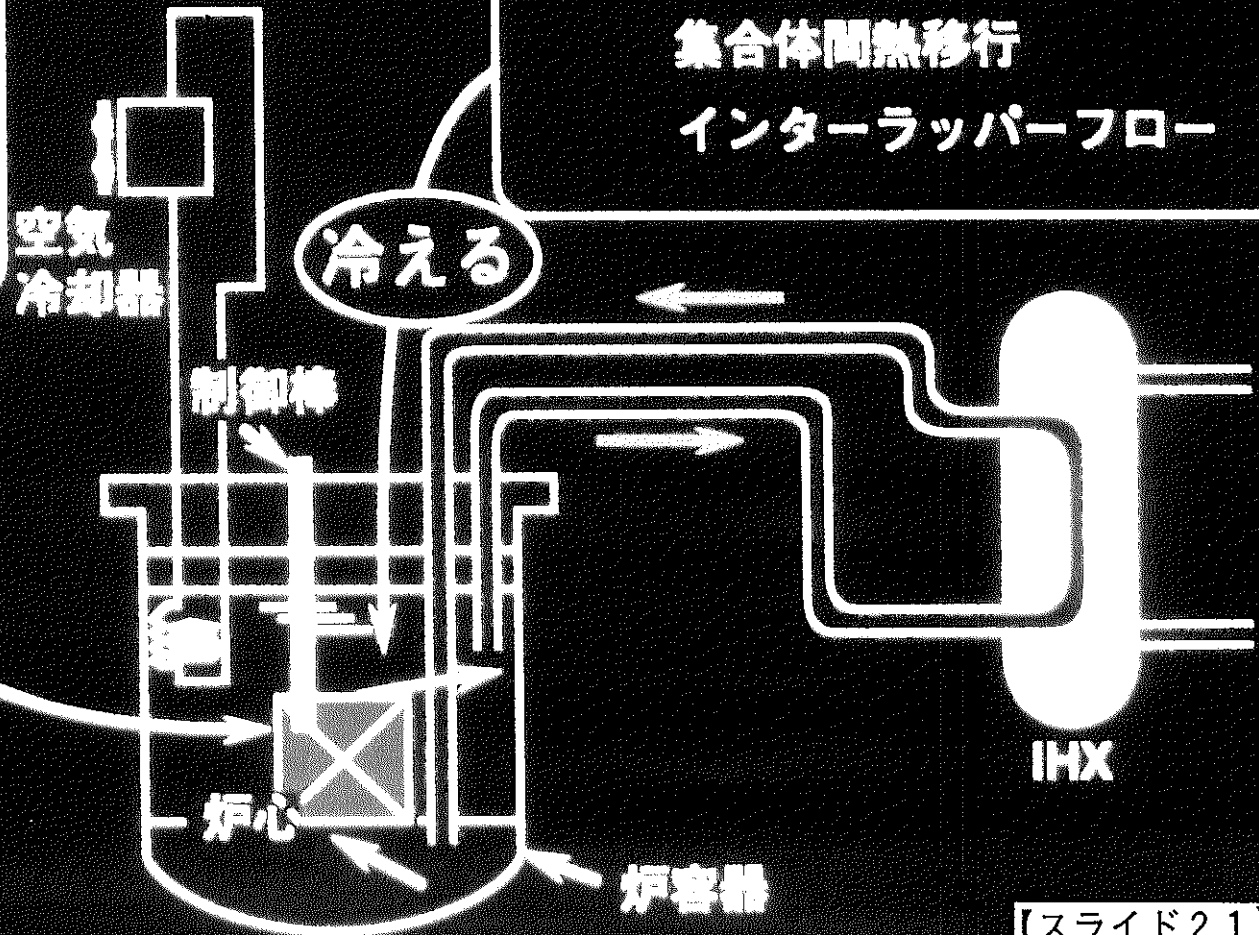
- ・ 自己作動型炉停止機構
- ・ 制御棒駆動軸の熱伸び
- ・ 炉心径方向膨張 等

止まる

## ● 自然循環崩壊熱除去

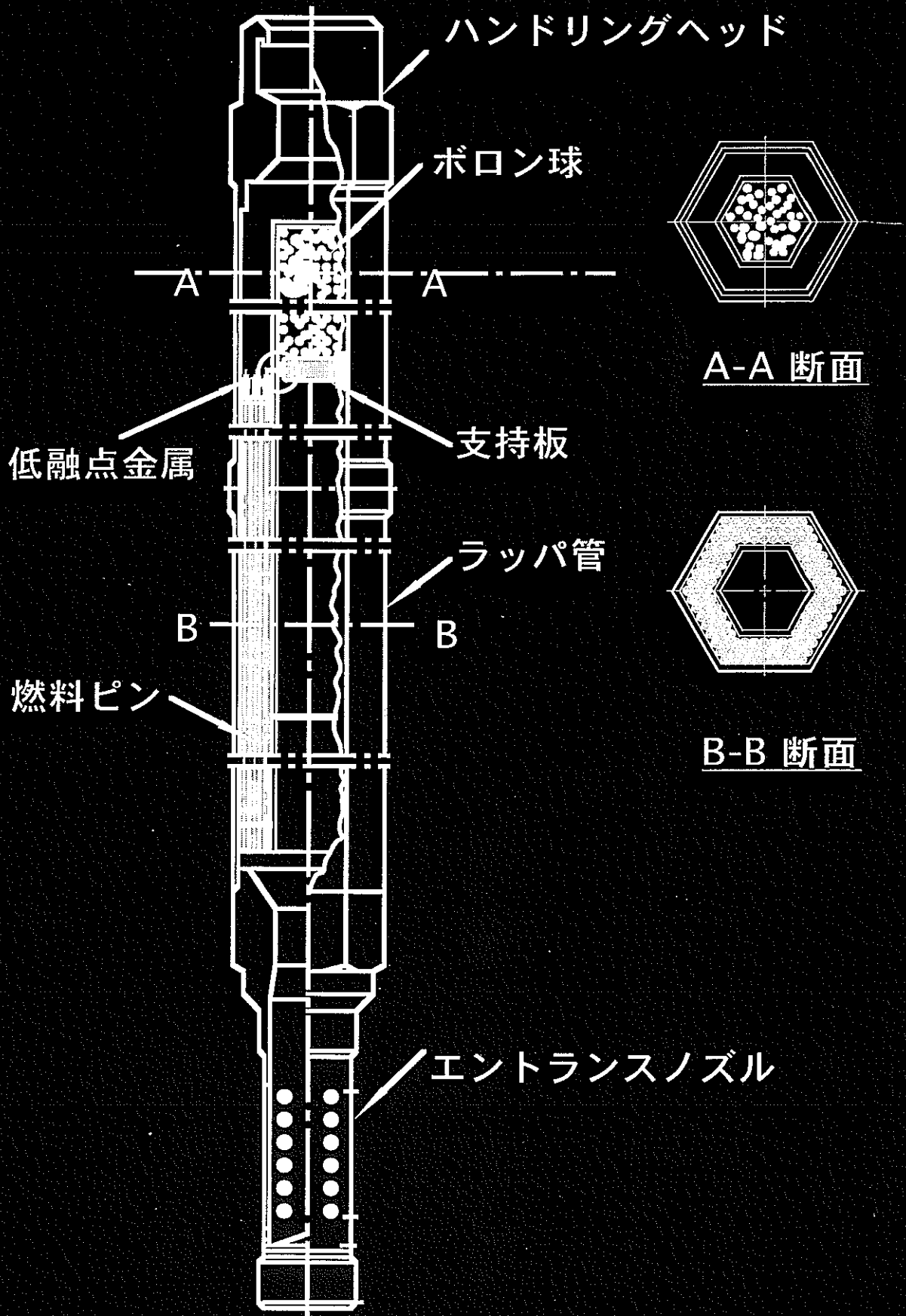
- ・ 系統／炉容器内自然循環
- ・ 炉心内径方向熱移行  
集合体間熱移行  
インターラッパーフロー

冷える

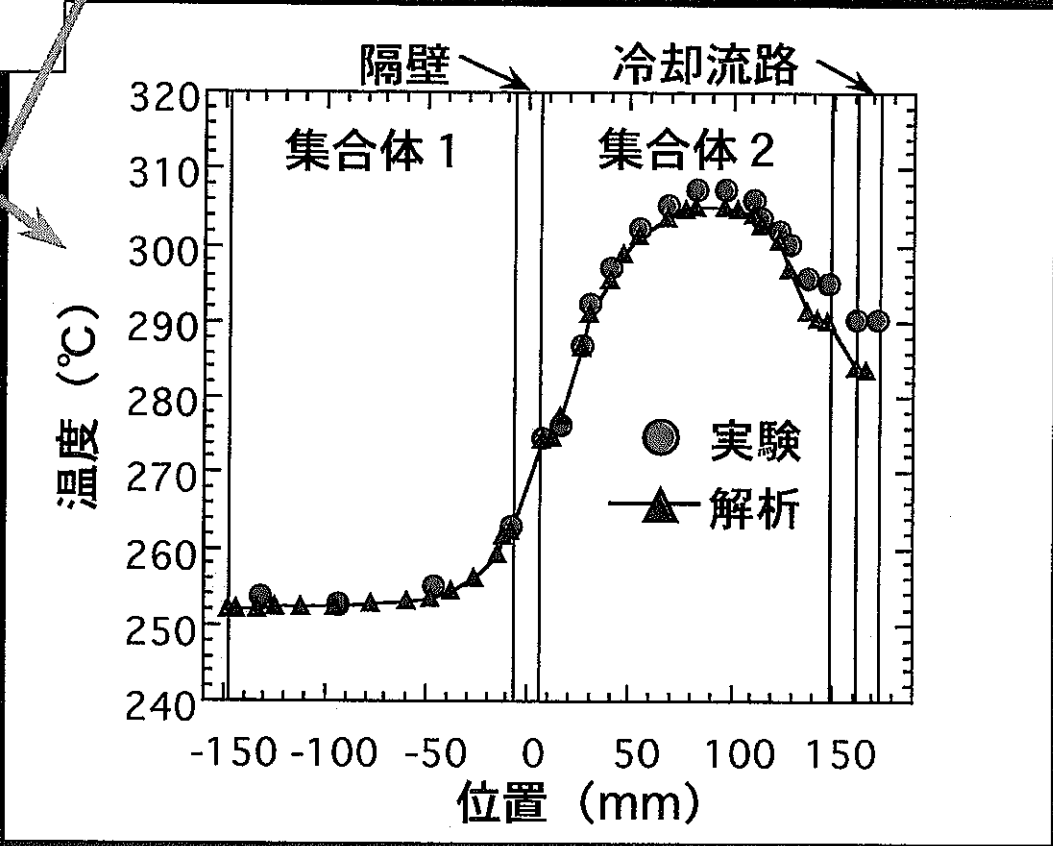
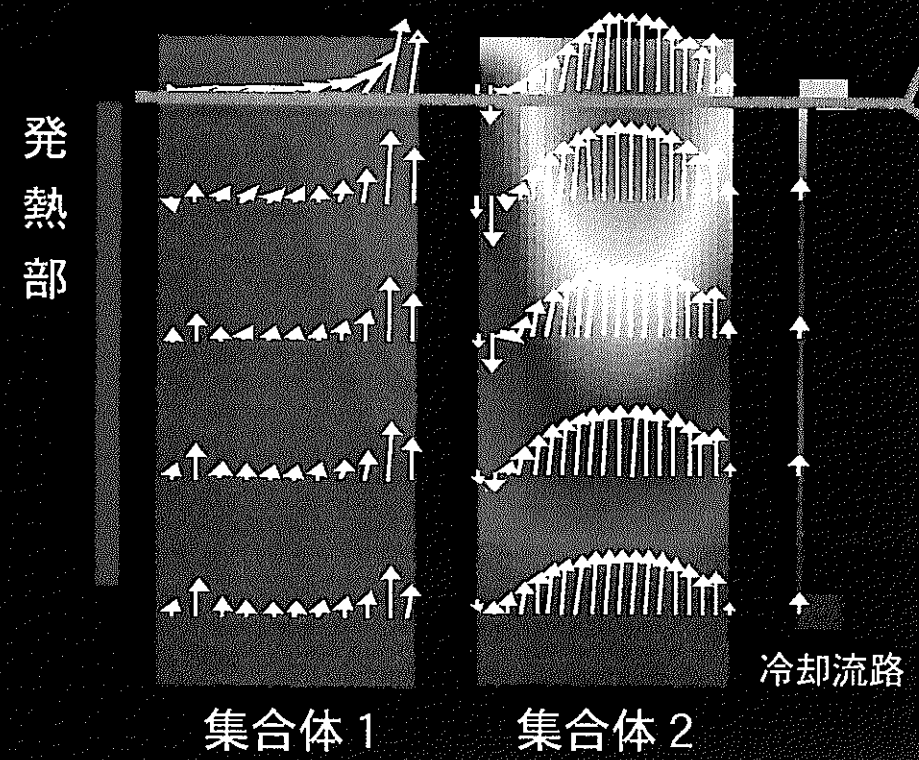
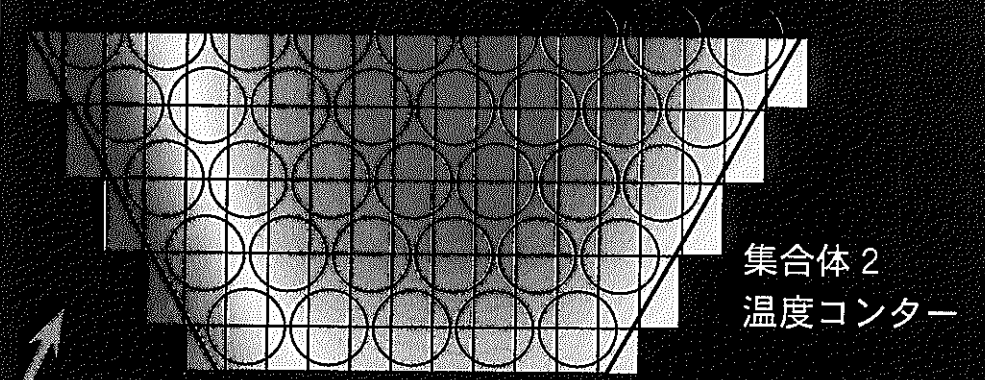
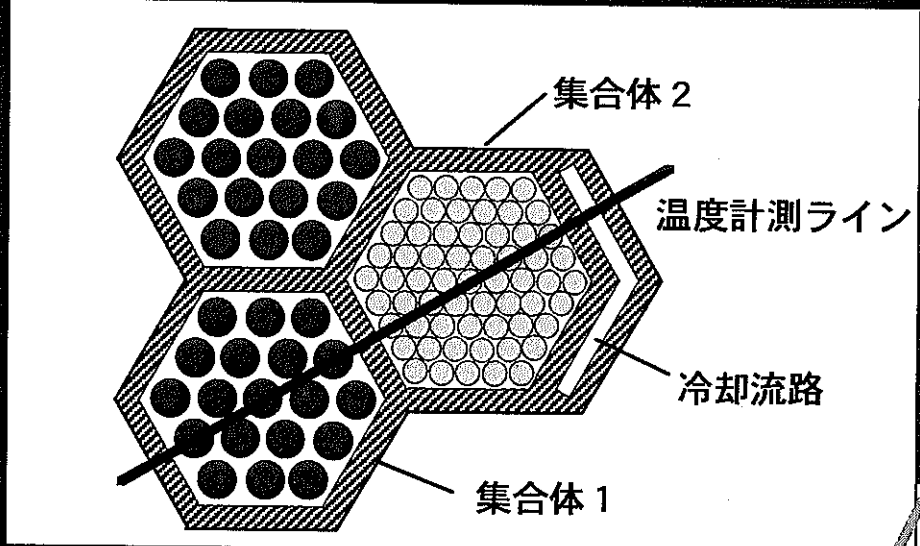


【スライド21】 A

【スライド22】 A

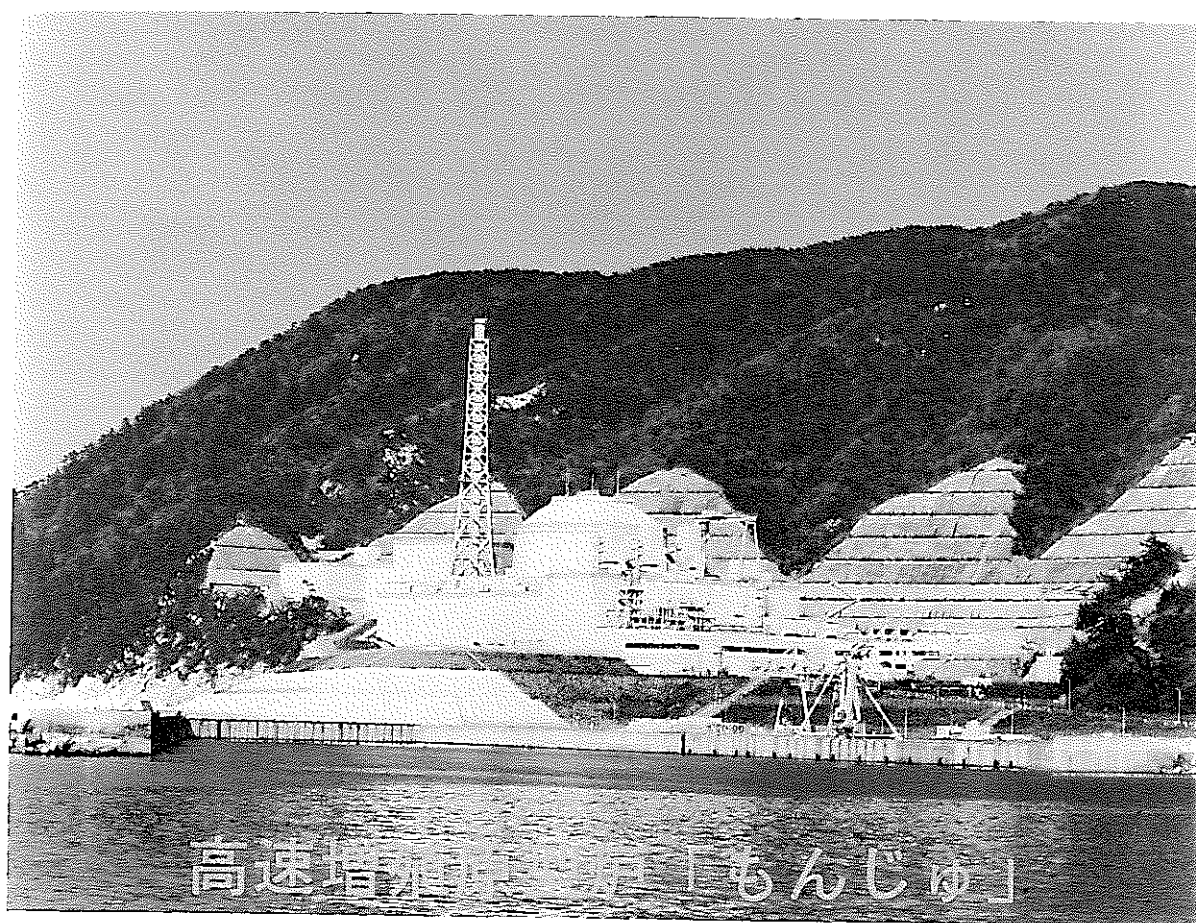


集合体内蔵型自己作動吸収体落下機構



自然循環時の燃料集合体内熱流動解析





# 信頼性向上のための研究開発課題

「もんじゅ」による  
運転・保守技術の高度化

- ・ 海外炉経験の反映
- ・ 運転・保守支援技術

稼働率向上のための研究開発

## 最近の海外のトラブル経験（代表例）



PFR

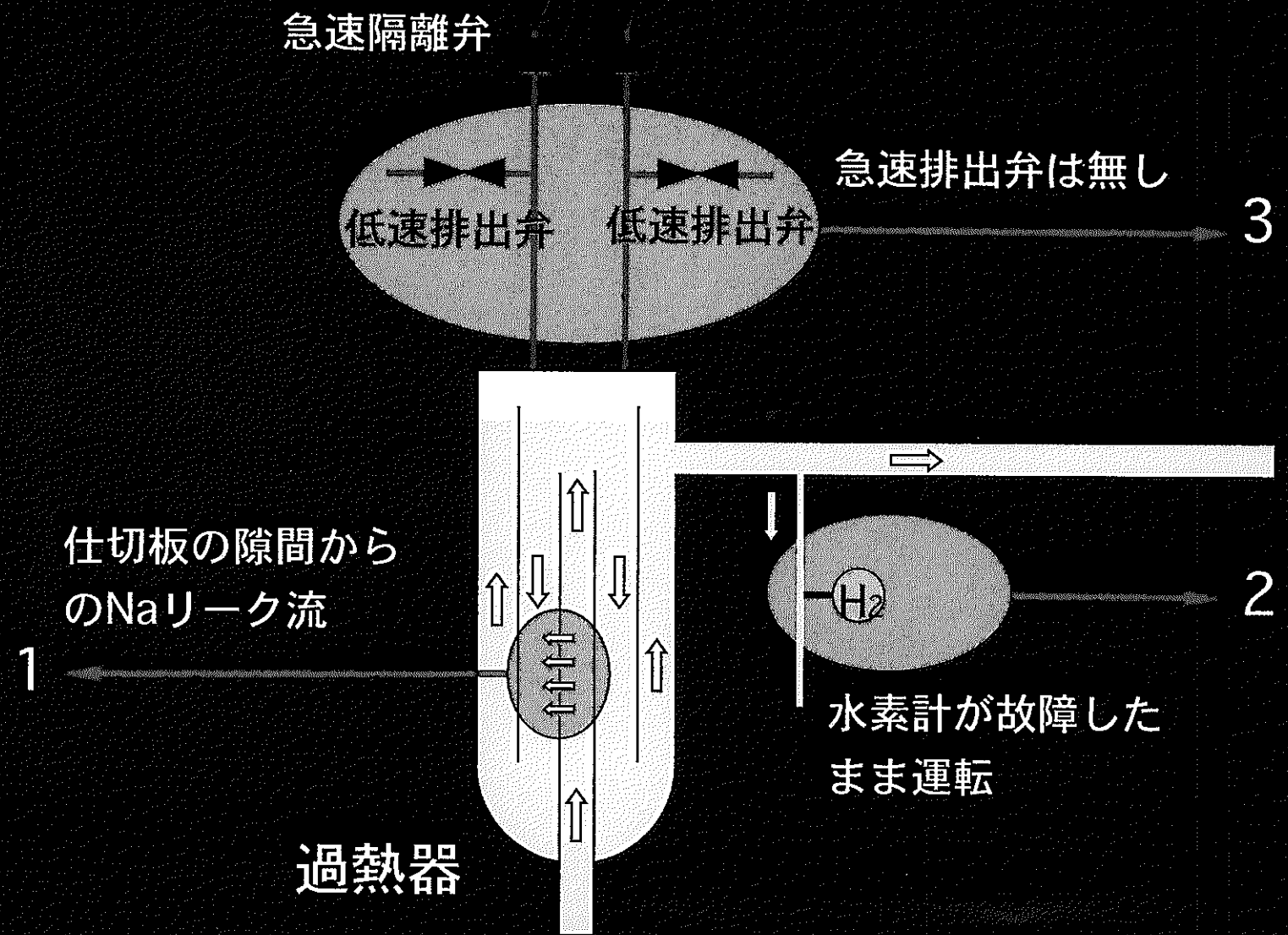
- ・ 蒸気発生器伝熱管水リーク

Phenix

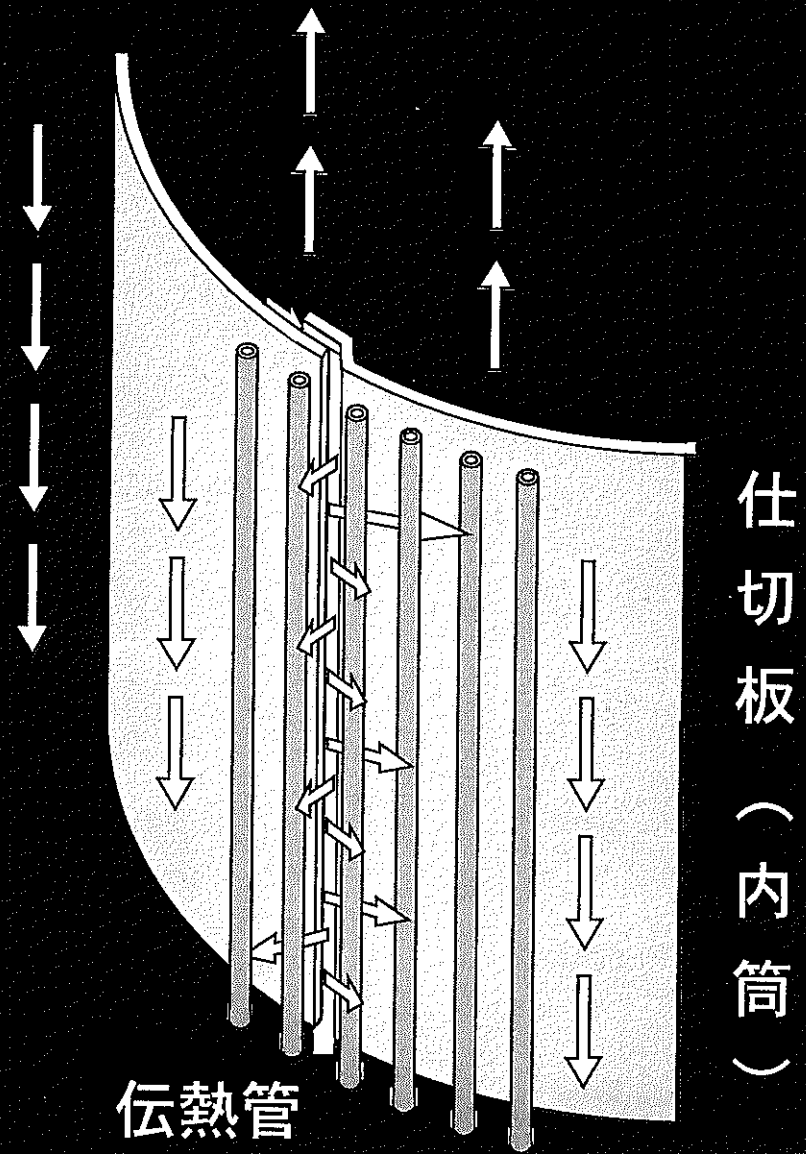
- ・ 2次ナトリウム系配管のクラック

SPX

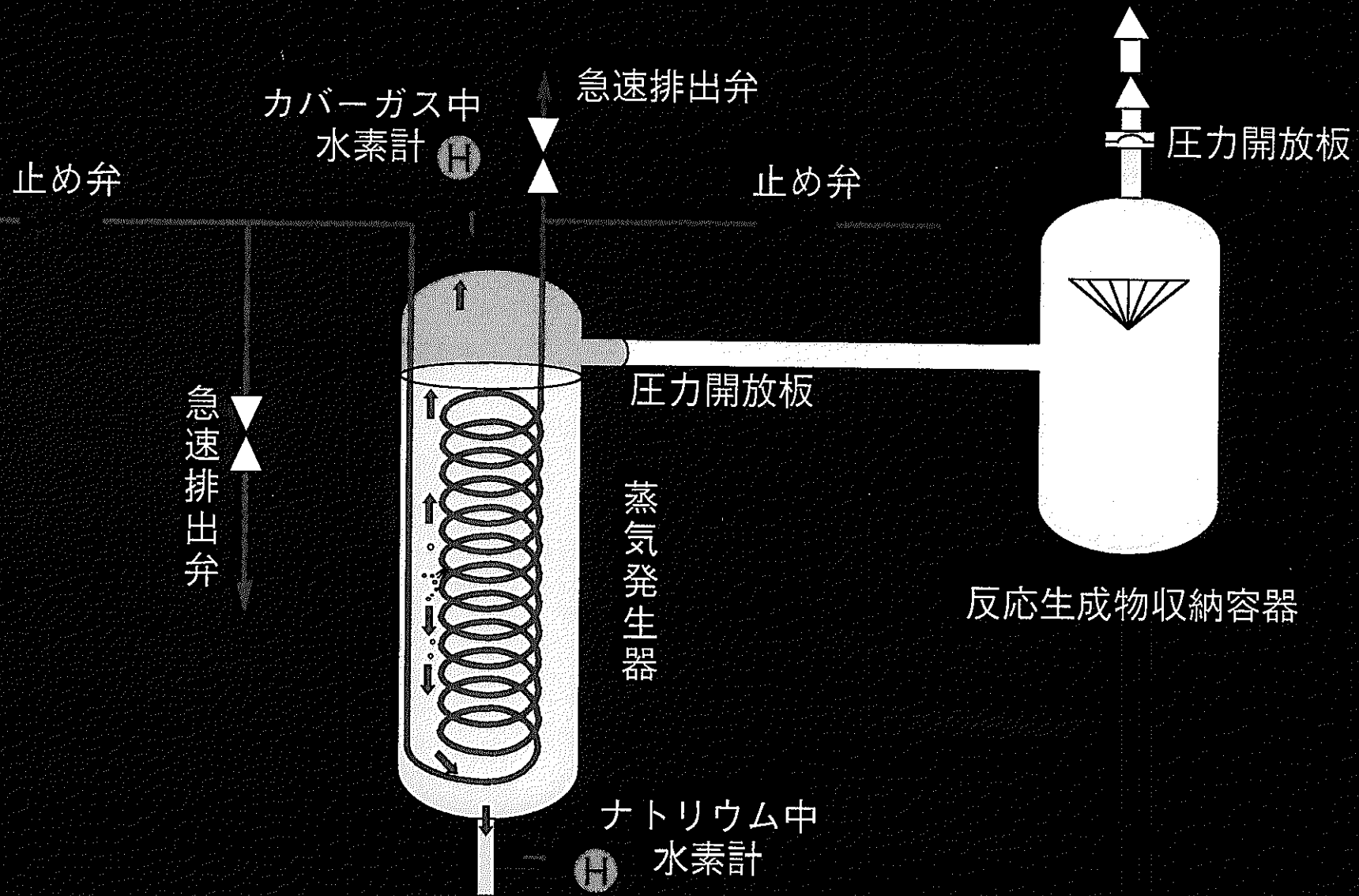
- ・ 炉外燃料貯蔵槽からのナトリウム漏洩
- ・ 1次ナトリウム系への空気混入



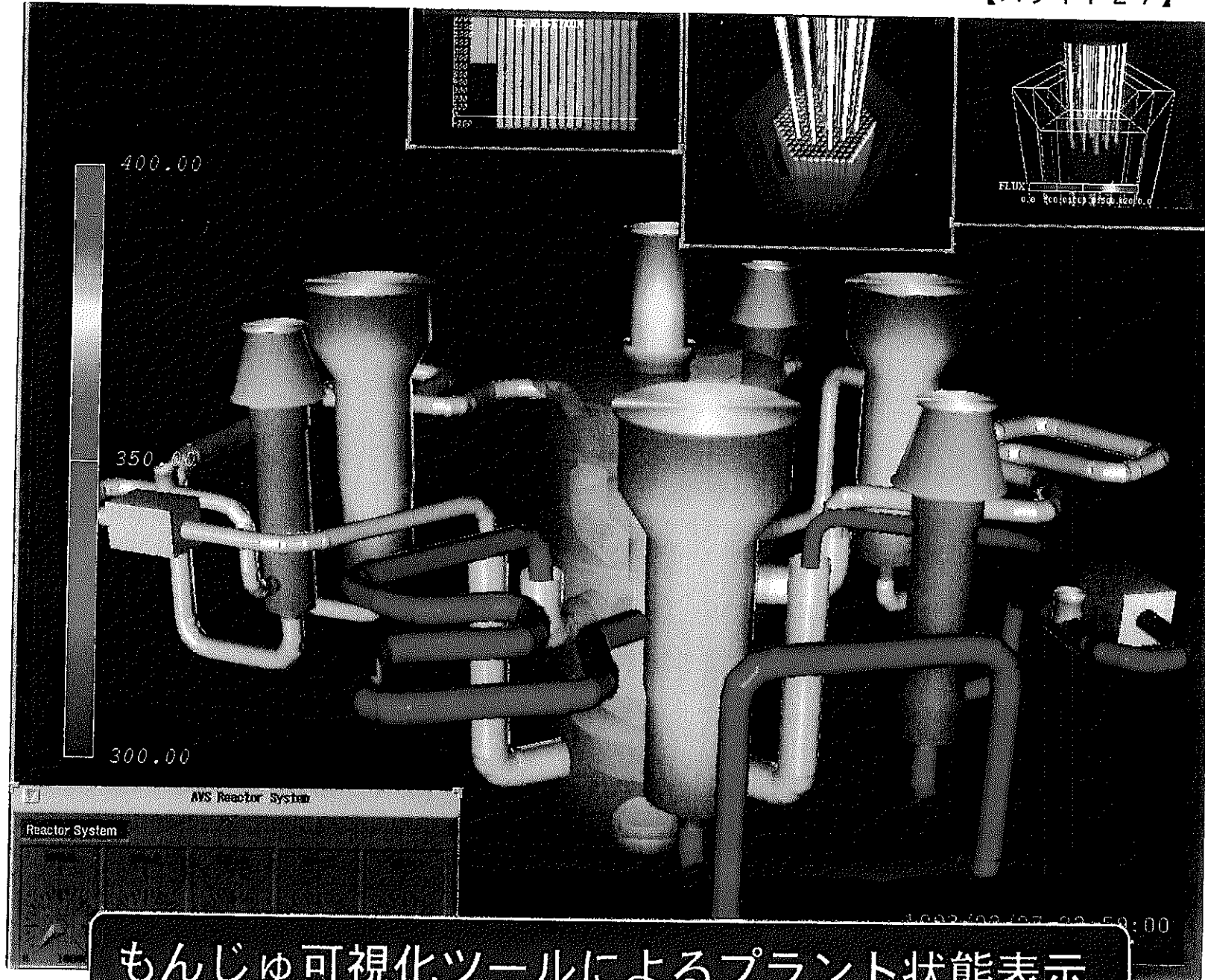
# PFRの蒸気発生器水リーク事故の原因



仕切板の隙間からのNaリーク流



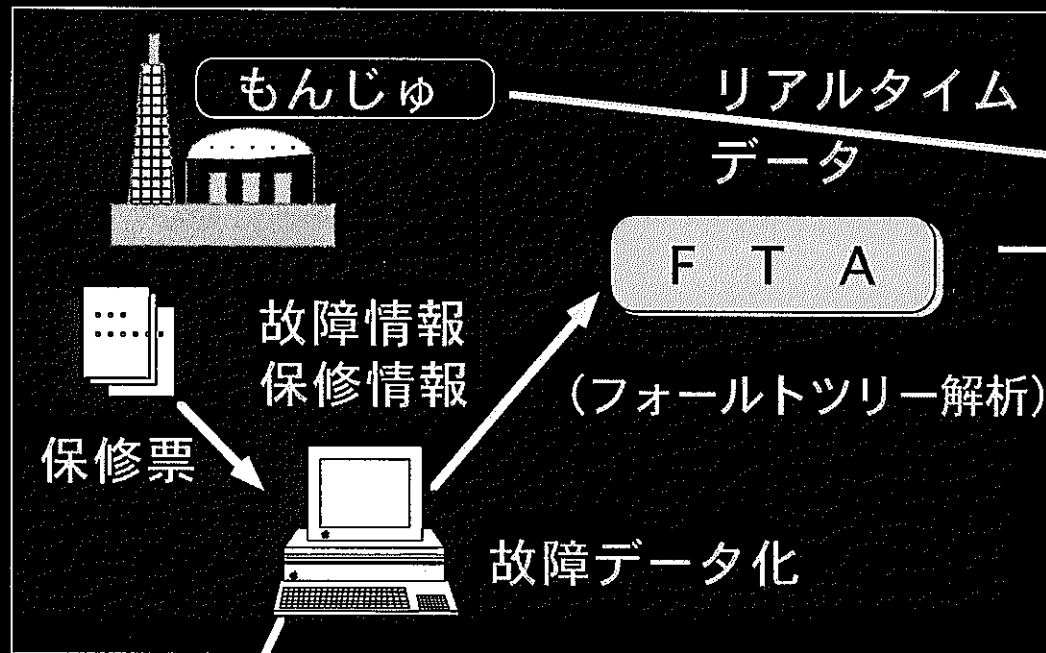
「もんじゅ」蒸気発生器の水漏洩検出系と急速排出系



もんじゅ可視化ツールによるプラント状態表示

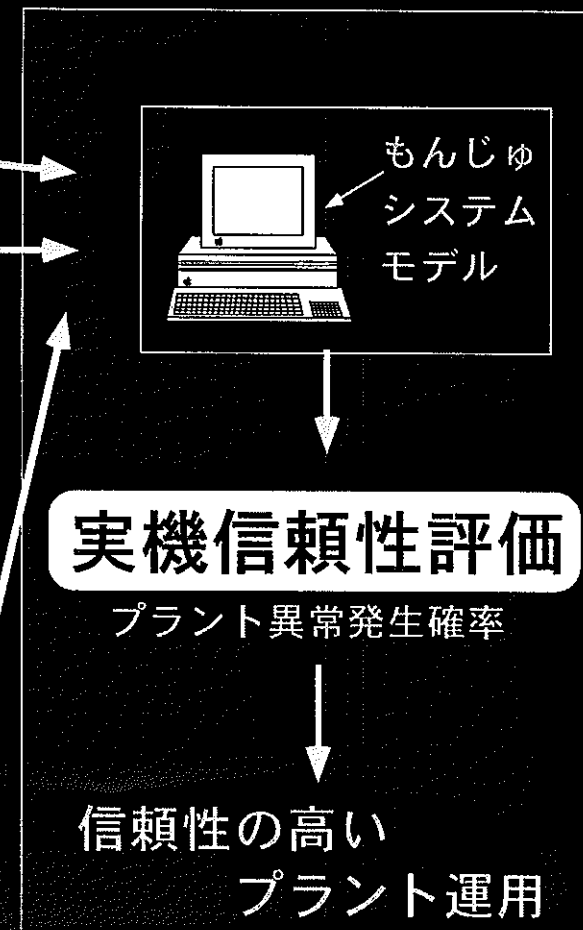
# 「もんじゅ」による運転・保守支援技術の開発

## 機器信頼性情報の集約と信頼性分析



大洗工学センター  
**CREDO**  
高速炉機器信頼性データベース

## リビングPSAシステム



**実機信頼性評価**  
プラント異常発生確率  
↓  
信頼性の高い  
プラント運用



# 「もんじゅ」による 稼働率向上のための研究開発

- ・ 運転サイクルの長期化
  - ・ 燃料交換期間の短縮
  - ・ 定検期間の短縮
  - ・ 計画外停止の予防
- ・ 燃焼欠損反応度が小さな炉心
  - ・ 長寿命制御棒
  - ・ 燃料交換機の自動化・炉内常設化
  - ・ Na機器・ISI技術の高度化（可視化等）
  - ・ 遠隔保守技術
  - ・ 被ばく低減化技術（CP除去）
  - ・ 運転支援技術（誤操作防止技術）
  - ・ 予防保全のための保守支援技術
  - ・ リビングPSA



海外研究者の招聘



「もんじゅ」での外国人研究者との交流風景

【スライド30】 A  
【スライド31】 A  
【スライド32】 A

## まとめ (1/2)

1. 2030年頃の実用化段階に、発電コストにおいて軽水炉に十分競合しうる高速炉リサイクルシステム（高速炉／MOX燃料／ピューレックス法再処理）を構築できる見通しを得た。
2. 今後の研究開発の展開
  - (1) 信頼性・安全性・経済性等、実用化に繋がる課題の研究開発を着実に推進

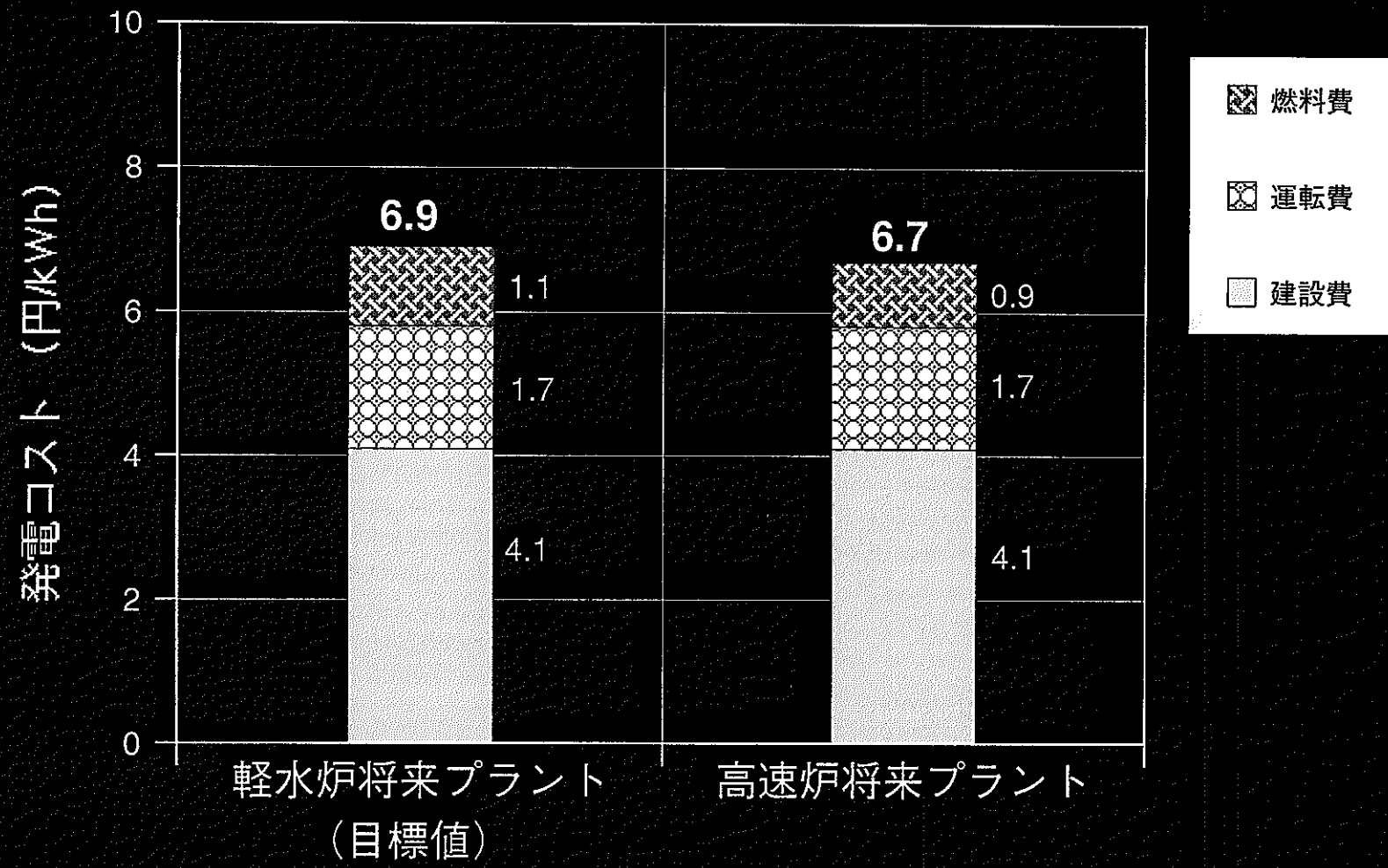
# 高速炉による核燃料リサイクルの 経済性評価

目標(軽水炉比)    評価値(将来プラント)

炉建設単価：	同等以下	1.0～0.8
炉稼働率：	85%以上	同左
燃焼度：	15万MWd/t以上	同左
燃料製造単価：	3倍以下	2.6
再処理単価：	2.5倍以下	2.0



発電コスト：	6.9 円/kWh以下	6.7 円/kWh
--------	-------------	-----------



将来プラントの発電コストの目標値と評価値

## まとめ (2/2)

### (2) 研究開発課題の実証・適用が重要

- 燃料製造：プルトニウム燃料第3開発室
  - 再処理：RETF等
  - 高速炉：「もんじゅ」等
- の積極的活用と成果の実証炉等への反映

— 炉と核燃料サイクル部門との有機的な連携

— 民間の建設・運転主体と一体となって課題の共有化

— 研究開発の進展に伴い、適宜、経済性評価の見直し  
を実施



説得性があり魅力ある高速炉リサイクルシステムの構築