

2003 年 5 月

第 13 回もんじゅ・国際技術センター技術報告会 発表資料

編集 高速増殖炉もんじゅ建設所 技術課

要 旨

平成 16 年 3 月 10 日（水）、敦賀本部もんじゅ国際技術センター情報棟エムシースクエアにおいて「第 13 回もんじゅ・国際技術センター技術報告会」を開催した。

本報告会は、高速増殖炉もんじゅ建設所及び国際技術センターにおける技術的成果について、官庁関係者、電力事業者、大学関係者、メーカーの他、広く一般の人々を対象に発表するとともに、成果の公開及び理解促進を図ることを目的として、毎年開催しているものである。

今年度は、国際技術センターからもんじゅの特性評価と供用期間中検査技術開発に関する報告を 4 件、もんじゅ建設所からもんじゅの信頼性向上に関する技術開発について 3 件、その他、大洗工学センターから「常陽」MK-III 性能試験結果について 1 件を報告した。また、特別発表として、社内公募型研究推進室から「雷雲中における放射線発生機構に関する研究」に関する報告を行い、さらに、原子力委員会 町 末男 委員をお招きし、世界のエネルギーと環境問題の現状と今後の予想や国際協力について講演をいただいた。

当日は、官庁、電力、メーカーなどの外部関係者約 60 名に加えてサイクル機構職員も約 40 名出席し、延べ 100 名が出席し、各発表後の質疑応答では、出席者からより専門的な質問や意見が多数寄せられ、活発な議論が行われた。

目次

I. 第 13 回もんじゅ・国際技術センター技術報告会 議事メモ	議 1
II. 第 13 回もんじゅ・国際技術センター技術報告会 質問・要望事項等	質 1
III. 第 13 回もんじゅ・国際技術センター技術報告会 発表資料	
1. プログラム	1
2. 特別発表	
「雷雲中における放射線発生機構に関する研究」	3
3. セッション I：もんじゅの特性評価と供用期間中検査技術開発	
① 仏国 ERANOS システムによる「もんじゅ」炉心臨界性解析	24
② プラント熱過渡裕度評価	32
③ 蒸気発生器伝熱管 ECT センサの開発	37
④ 伝熱管 ECT センサ用プローブの搬送挙動とノイズ	49
4. セッション II：もんじゅの信頼性向上に関する技術開発	
① 「常陽」MK-IIIの性能試験結果	59
② タギング法破損燃料検出装置の改良の検討	
－タギング法破損燃料検出装置モックアップ試験の概要－	76
③ 冷却材ナトリウムの迅速分析法の検討	83
④ ナトリウム漏えい対策 ー断熱材敷設評価と床ライナの健全性評価ー	88

I. 第 13 回もんじゅ・国際技術センター技術報告会 議事メモ

日時：平成 16 年 3 月 10 日（水）10:00～16:40

場所：敦賀本部もんじゅ国際技術センター情報棟 エムシースクエア

出席者：約 100 人（うち外部関係者は約 60 人）

【特別発表：雷雲中における放射線発生機構に関する研究】 10:15～10:55

社内公募型研究推進室 鳥居 建男

質疑応答

Q 1：日本中で北海道から鹿児島まで各電力会社、自治体を含め、TLD の観測結果は約 10 万件ある。その内、雷を感じたものが 2 件だけあった。それが敦賀ともんじゅである。雷を感じたものは、レベルが非常に高く、立石から浦底までおよそ 3km と広範囲に及んだ。一方、雷活動時の放射線変動の特徴というスライドの中で影響エリアは数 100m で範囲が狭いという説明があったが、範囲が広いものと狭いものでメカニズムが違うのか。

A 1：放射線の影響を受ける範囲が局所的であるということはまず間違いないと考えている。今年の 1 月にもあったが、影響を受ける範囲は、白木からもんじゅの MP-3、4 という範囲であり、もんじゅ構内にある MP-1 は全く影響を受けなかった。先程、少し説明したが、開始時間のズレがあり、ズレがあるということは、線源が移動するということであると考えられる。立石から浦底まで高電界の領域が移動した可能性がある。同時間では局所的だが、時間のズレは多少あると考えられる。

Q 2：放射線挙動解析について主に説明があったが、放射線測定についてはこれからが主に行っていくのか。それとも、今回報告がなかっただけで、既に放射線飛来方向検出器の開発等は既に実績があるのか。

A 2：シンチレーション光ファイバーという放射線に感じる光ファイバーを用いて、その両端で増幅して時間差を利用して、どこに放射線が入ったかを測定する。これを半球状に曲げ、十字に組んで、どの方向に放射線が来たのかを 2 次元で検出できると考えている。また、セシウムの線源を用いて移動させると移動できることがわかっている。モンテカルロ計算を行うと、60° くらいの位置で感度が悪くなるが、概ね方向特性が取れる計測器を製作した。一昨年から測定を開始し、データを取っているが、設置後、設置場所付近で明確な影響を受けるほどの大きな雷はなかったことから、はっきりとしたデータはまだ取れていない。今も継続して測定中である。

Q 3：回数も多く、強度も高い、線量率という表現をした時に大きく現れたのは平成 5 年である。今年は 10 年振りに雷が多いが、そういった周期や経年変化というの

は関係があるか。

A 3 : 理科年表に載っている気象データの敦賀で見ると 1941 年から 1970 年では冬の雷は平均 7 日である。一方、1971 年から 1998 年では、平均 15 日と倍増している。ところが、夏の雷は変動していない。この理由は、中国の砂漠化によりラドンが飛来していないか、ラドンが増加しているから雷が増加しているのではないかと推測している。気象データの風の方向と雷が一致しているので、ラドンの影響の可能性を検討するために、フェリーを使ってラドンの測定を行っている。また、ラドンは γ 線には影響しないが、電子密度を上げるということが計算で分かっている。このことから、発雷には影響を与えていると考えている。

Q 4 : 計測器は電離現象や (TLD にしても NaI にしても同じであるが)、こういう現象を捕まえられた場合、計測器側の対応をどう考えているのか。現象を解明できれば良いと考えているのか。

A 4 : 飛来方向の測定器は雷の線源を求めるために製作したが、建物の中に据付ければ、核物質移動にも使用可能と考えている。今回は 1 台しか作らなかったが、3 台あれば 3 次元で線源移動を求めることができる。また、外に据付ければ、事故時の拡散データを今は計算値しか見ることができないが、実測値を見ることが可能ようになる。ただし、雷観測のために新たな測定器を製作する予定はない。

Q 5 : 日本海側には柏崎、島根に原子力発電所があるが、柏崎では雷はあまり発生しないのか。

A 5 : 下に暖かいもの、上に冷たいものがある場合に、急激に上昇気流が発生すると雷が発生する。冬季雷の場合、これが対馬暖流である。暖流は北へ行くほど弱くなるため、雷の発生も少なくなるが、柏崎でも雷による線量上昇は発生している。東電の柏崎発電所からデータを貰ってもんじゅの場合とよく似たデータを確認している。もんじゅのデータは 10 秒値、一般に他の原子力発電所では 1 分値が多いので、データが粗く細かいデータが採れていない。

【セッション I : もんじゅの特性評価と供用期間中検査技術開発】 10:55~12:35

(1) 「仏国 ERANOS システムによる「もんじゅ」炉心臨界性解析」

国際技術センター 炉心技術開発 Gr. 影山 武

質疑応答

Q 1 : 今回行われた 4 つのコードによる解析のうち、MEISTER は中性子エネルギー群数やメッシュ数などが他の解析とかなり異なっている。解析条件の組み合わせの違いが結果に影響していないのか。

A 1：今回は各コードの標準的な解析条件を元に計算を行ったため、コードごとに条件が異なった。しかし、各コードのノミナル値に対してメッシュ補正、群縮約補正を行い、すべての値を「無限群（＝連続エネルギー）、無限メッシュ相当」として比較している。従って結果の比較には解析条件の違いによる影響はないものと考えている。

Q 2：古くから欧州の解析コードは 2000 群クラスの詳細群断面積を標準としている。欧州解析コードの特色を生かす観点から、今後の ERANOS コードの検討では、まず詳細群断面積による解析の実施を優先してはどうか？また、今後の検討の際には CEA カダラッシュ研究所駐在時に ERANOS の使用経験をつんだ大洗・中性子工学グループのメンバーとよく相談してほしい。

A 2：拝承。

(2) 「プラント熱過渡裕度評価」

国際技術センター システム技術開発 Gr. 山田 文昭

質疑応答

Q 1：A ループ EV 出口蒸気温度低下の要因は、プラントトリップ時に蒸気発生器内に流れる微小な Na 流量のループ間差であるという検討は、大変有意義だと思う。そこで、蒸気発生器に流れる Na 流量にループ間差があるとすると、EV 出口 Na 温度の試験結果にはループ間で差異は生じていないのか。

A 1：EV 出口 Na 温度は、蒸気ブロー除熱により初期温度から緩やかに降下し、蒸気ブロー終了後には一定温度となる。この温度変化において A ループは、他ループに比べ、若干高く温度推移することから、A ループは早く蒸気ブロー終了したことが伺える。

Q 2：試験結果の A ループ EV 出口蒸気温度低下の程度は、熱過渡上、問題となるものではないと考えられる。そこで、出口蒸気温度低下を緩和方策としてトリップ時の A ループ蒸気発生器に流れる Na 流量を増加させる方法を取り入れた場合、それに関連した影響についても検討しなければならない。

A 2：A ループ EV 出口蒸気温度低下の程度は、熱過渡上、問題となるものではないが、運転上、課題となる。前回試験においても過熱器湿分流入防止インターロックが作動寸前まで出口蒸気温度が低下した。インターロックが作動した場合は、予定のトリップシーケンスとは異なり、この場合には、対外的にも技術的な説明が求められる。したがって、出来るだけ前回経験した挙動は分析し、実施可能な緩和方策を明らかにしておきたいとのことで検討した。なお、Na 流量は、2 次主冷却系の主流量から ACS へ流れる流量を差し引いて蒸気発生器へ流れる Na 流量を求め

たが、低流量時の主流量の流量計の計測誤差が大きいため、本当にループ間で流量差があったかは確認できない。次期試験では、SG 入口止め弁バイパス弁の下流の流量計にて、トリップ時の Na 流量を計測することが必要と考えている。

Q 3 : R/V 出口ノズル部の熱過渡余裕は、設計の構造評価に対して、実機の温度挙動で解析すると 3 割程度の余裕を有する結果であり、実プラントでは更に熱過渡余裕は大きくなる。

A 3 : その通りである。

Q 4 : S-COPD は熱流動解析コードだと思うが、熱応力解析も同コードで実施できたのか。

A 4 : 自社所有の FINAS コードを使用して、熱応力解析を実施した。設計当時の熱応力解析は NASTRAN コード（三菱コード）で実施しており、その NASTRAN の解析結果を FINAS で再現解析し、解析モデル、解析結果の再現性を確認し、実機ベースの熱応力解析を FINAS で実施した。

（３）「蒸気発生器伝熱管 ECT センサの開発」

国際技術センター ISI システム技術開発 Gr. 椎名 章

質疑応答

Q 1 : ISI 校正建物は見学できるか？

A 1 : 見学可能である。

Q 2 : 管板（と伝熱管）の接続部で問題がある（トラブルが生じやすい）。また、管板信号が大きく探傷が問題となる。

A 2 : もんじゅの管板部は、厚い板材を削り出して（Na 側を）伝熱管状に加工して、この管板から出ている管と伝熱管を溶接で接続しており、漏れなどが発生し難い構造になっている。なお、管板信号が大きく探傷が難しいことも承知している。

Q 3 : ISI 校正建物でヒータを巻いた装置があるそうだが、どのようなものか教えて欲しい？

A 3 : 原子炉容器廻りの検査装置用のモックアップ試験装置があるが、実機の検査環境である 200℃を模擬できるようにヒータと保温の増設工事をしている。工事はほぼ終了し、昇温試験を実施しているところである。

Q 4 : サポートにより信号がシールドされるので、その改善を目的に WRF センサーを使っているが、SN は通常の RF と変わらないと思う。

A 4：短管試験片のようなものであればその通りであるが、曲がり部や振動ノイズに対しては改善効果が大きい。実機探傷には効果がある。

Q 5：県のもんじゅ安全性検討委員会で、蒸気発生器の検査性能の向上と早期開発が望まれていた。早く十分なものを開発して欲しい。

A 5：出来る限り努力します。

(4) 「伝熱管 ECT プロブ搬送挙動とノイズ」

国際技術センター ISI システム技術開発 Gr. 今井 義之

質疑応答

Q 1：挿入時にノイズが出るのであれば、引き戻し時に探傷してはどうか？

A 1：挿入時と比較すればノイズは小さいが、引き戻し時にもノイズはある。根本的に減らしたい。また、探傷時間の短縮を迫及しており、引き戻しほど挿入速度を早くできないので挿入時の探傷が効果的と考えている。

【特別講演：日本の原子力開発と国際的役割】

13:25～14:15

原子力委員会 町 末男 委員

まず、御自分の IAEA における 12 年にわたる経験を紹介された後、首相演説、エネルギー政策基本法、エネルギー基本計画を踏まえて、核燃料サイクルを含む原子力開発が、エネルギー問題と環境問題を長期的に解決する手段と国が認めて進めているものだということを強調されました。次に、世界のエネルギーと環境問題の現状と今後の予想についてさまざまなデータに基づいて紹介されました。現在の世界は 20 から 22%の人口が世界のエネルギーの半分を消費している状況にあること、現状のエネルギー消費形態のまま途上国の産業が発展すると、100 年後には世界の 1 次エネルギー消費量は現在の 3 倍を超え、気温が 5.8 度、海水が 88cm 上昇し、マーシャル諸島などは水没するという分析が紹介されました。環境負荷の少ないエネルギー源の中でも、風力や太陽熱は、大きな設置面積が必要で気候依存性があり、コストが高いという問題があるという説明がありました。日本は、GDP 当たりの炭酸ガス生成量では最も優れているが、京都議定書を守ることは大変困難であることも紹介されました。

次に国際協力について、中国や韓国で盛んに原子力開発が行われており、中国で原子力発電所の建設費低減のために日本が協力することによって、偏西風で日本に運ばれる石炭プラントの排ガスを減らすことができること、韓国では IAEA の事務所があり、またアジア原子力大学構想を提案していること等、アジアでの原子力開発に関する日本の国際協力の可能性が示されました。一方、IAEA 事務局における日本人職員の比率を例に、日本人の国際社会への関心は必ずしも十分でないとの指摘もありました。国際社会で通用するに

は個性、国際的感性、議論への参加を通して新しい構想が描ける能力、一級の専門家であること、が必要との意見が述べられました。日本がナトリウム冷却高速炉と超高温ガス炉で重要な役割を担う GEN-IV が米国の提案によることは残念、との感想が示されました。千年オーダーでエネルギーを確保しつつ環境負荷を抑えることのできる高速炉を開発することは、日本の科学技術先進国としての国際貢献でもある、と「もんじゅ」及び「もんじゅ」を軸とした国際協力に対して強い支持が示されました。

【セッションⅡ：もんじゅの信頼性向上に関する技術開発】

14:15～16:30

(1) 「「常陽」MK-Ⅲの性能試験結果」

大洗工学センター 実験炉部 技術課 吉田 昌宏

質疑応答

Q 1：MK-Ⅲで得られた貴重なデータを広く使ってもらえるよう働きかけることも常陽の役目と考える。このための方策として、出力係数の数値が変動する現象がみられ、このメカニズムの解析をこれから行うのだろうが、それを大学等との共同研究としてコールド試験で確かめながら解析を行っていくことなどが考えられる。こういった試験結果は原子力の原点のデータであり、現状、貴重なものであるのでは是非役立てて欲しい。また、出力係数のグラフが波打っているように見える領域があるが、その理由は？

A 1：MK-Ⅱについては、全サイクルの炉心構成、原子数密度、出力係数測定結果などをデータベースにして公開済である。MK-Ⅲ性能試験結果については、評価を進め、まずは、成果報告書を適宜、公開していく。なお、今月（3月）末に開催される原子力学会春の年会でシリーズ発と企画セッションを行う。長期的にはMK-Ⅱと同様にデータベース公開を考えている。

次に、今回提示した OHP で出力係数が変動している原因について。まず、出力係数は、制御棒引抜により出力を上昇させ、プラントが安定した後、その間の熱出力の変化と制御棒による投入反応度から算出している。通常、制御棒引抜後数十分で、プラントは安定するが、特定の出力で、1時間にわたり熱出力が徐々に上昇したため、その領域の出力係数の絶対値が小さくなった。現在原因調査中であるが、ステップ応答試験による出力係数に変化がなかったことから、制御棒引抜直後のフィードバック反応度の変化によるものでないことは確認した。なお、上記現象が見られた熱出力において、2次補助冷却系 DHX の除熱を開始したことから、プラント操作の影響も視野に入れ、検討を行う。

(2) 「タギング法破損燃料検出装置の改良の検討」

もんじゅ建設所 技術課 斉藤 裕行

質疑応答

特になし。

(3) 「冷却材ナトリウムの迅速分析法の検討」

もんじゅ建設所 安全管理課 飯島 稔

質疑応答

Q 1 : グロー放電質量分析装置による高純度 Na の測定データ代表例において、水素濃度が従来法に比べ差が大きいのが、原因について推定できるものをすでにもっているか？

A 1 : この測定は、母材 Na のイオン強度を 100% として単純に元素のイオン強度から濃度を計算しているもので、そのままでは濃度は得られない。この装置は、鉄鋼分野、半導体分野でよく使用されているが、必ず標準物質を測ってそれぞれの元素のファクタを求め、それをかけて濃度に換算する。今回は、そのデータがないので単純にイオン強度を比較したので、そのままでは使えないのは私たちもわかっている。今回は、たまたま近い値となっているだけである。ファクタがいくつなのかまだぜんぜんわかっておらず標準物質を探している段階である。プラントから採取した Na を従来法で分析して標準として、校正することも計画している。

Q 2 : 酸素濃度については、実際プラントでは 1ppm くらいの値となる可能性もあると考えるが、そのような不純物濃度の低い時でも安定した測定ができる見通しはあるか。

A 2 : 今回、以前フランスから購入してあったナトリウムで品管用としてとってあったものを使用したもので 1.8~3.2ppm という従来法による測定結果となったが、実際にプラントで測定される 1~2ppm という低いものは、測定していない。実際には上記回答と同様にファクタを求めないと詳細な結果は得られない。

(4) 「ナトリウム漏えい対策

—断熱材敷設評価と床ライナの健全性評価—」

もんじゅ建設所 プラント第2課 芋生 和道

質疑応答

Q 1 : 断熱材とヒートシンク材の敷設効果の説明のところで、漏えい時の水素濃度は、判定基準を 4% と定めてそれ以下となっているが、断熱材とヒートシンク材がないと 4% をこえる値にこの評価法だとなるのか。

A 1 : なくとも 4% をこえることはない。

以上

Ⅱ. 第 13 回もんじゅ・国際技術センター技術報告会 質問・要望事項等

質問・要望シート

<質問・要望事項等>

「雷雲中における放射線発生機構に関する研究」に関する質問

配布資料 S-1-20「宇宙から見た雷放電」について、落雷が陸地に集中している理由などあれば、教えていただきたい。また、雷雲の型などにも影響されるのか。

<回答>

雷放電が発生するためには、当然のことながら雷雲が必要となる。雷雲が発生するためには、急激な上昇気流が必要となる。地上と上空の温度差が著しくなり上昇気流が発生するのは、やはり陸上の方が多いことによるものと思われる。いわゆる熱雷である。

ただ、報告会でも説明したように、雷雲の高電界だけでは放電は起きないと思われる。雷雲内で測定された電界強度は最大値であるとは限らないが、少なくとも観測されている電界強度では放電は起きない。そこで、トリガーとしてエネルギーの高い放射線による雷雲高電界領域での電磁シャワーの発生が起因していると考えている。もし、トリガーとしての放射線が宇宙線だけならば、雷雲が発生する条件があれば、海陸を問わず、どこでも発生すると考えられる。スライドの冬季の図を見て頂くと分かるかと思うが、三陸沖にも雷の発生が見える。これは、黒潮とシベリア寒気団による雷雲の発生によるものである。もし放射線トリガー説（勝手に名前を付けたが）が正しいなら、これが宇宙線によるものか日本列島からの R_n の寄与が大きいのかは分からない。そこで、一昨年の冬からフェリーで日本海側と太平洋側で R_n の測定をしている（冬季と夏季）。何分、研究は一人で行っているため、時間の関係で十分調べ切れてないが、今後とも続けていきたいと考えている。

なお、昨日の発表では、 R_n の雷雲中での挙動は説明しなかったが、地上での放射線（ γ 線）量の寄与は無視できるが、雷雲中での電子密度の増加という意味では無視できないくらいの上昇がある。

質問・要望シート

<質問・要望事項等>

「雷雲中における放射線発生機構に関する研究」に関する質問

宇宙線ミュオンが登場するなど興味深い発表であった。また、測定器の開発からフィールドでの測定も実施しているとの説明にも聞き入っていた。これまでの研究を取りまとめたもの（発表されているもの）を一部頂きたく。

<回答>

この分野は、地球物理や気象、大気電気学、プラズマ物理等にまたがるため、一番発表の多い米国地球物理学会連合(AGU)のJGR(Journal of Geophysical Research)やそのレター誌であるGRL(Geophysical Research Letters)に投稿している。

論文に書いたReferenceの論文も併せて参考願う。

この他にも、近日中に発行される本”Radioactivity in the Environment”(Elsevier Science)にも、論文が載ることになっている(ただし、内容的には少し古いので、JGRとGRLの論文で昨日発表した内容の2/3はカバーしている)。

また、レビューは、「放射線科学」誌(昨年7月号)と「放電研究」誌(昨年10月号)に書いているが、内容的には、「放射線科学」で代表される。

誘雷手法の研究は、昨年、つくばの高エネルギー加速器研究機構で1週間ほどマシンタイムをもらい加速器からのミュオンや電子を電界中に照射する実験を行った。また、来年度も行う予定である(2月に高エネ研での審査があり、先日許可がおりた)。まとまった段階で、またお話ししたいと思う。

質問・要望シート

<質問・要望事項等>

「プラント熱過渡裕度評価」に関する質問

OHP8（40%タービントリップ試験解析）について

1. 2次系ナトリウム A、B、C ループの各流量の測定値は同一であるか。
2. 2次系ナトリウム A、B、C ループの各流量の測定値が同一だったとすると、蒸発器ナトリウム流量の違いは、蒸発器入り口止め弁開度の微妙な違いによって生じたと考えて良いか。

<回答>

1. 2次主冷却系フローコストダウン終了時の主流量（ポニーモータ流量）は、A ループ約 280m³/h、B ループ約 315m³/h、C ループ約 290m³/h であった。また、それ以降の主流量は減る傾向を示しており、時間とともに自然循環力が低下したことを窺わせた。なお、記録されたデータの主流量計レンジは、0～5600m³/h であり、定格時の振れ幅は約 3 %（約 130m³/h）を有する。したがって、計測値の差異は誤差範囲であり、ほぼ同じ配管長の A と C ループの間で流量差が実際に生じたかは明らかではない。

ACS 出口 Na 流量（0～400m³/h レンジ）は、SG 入口止め弁閉止に伴い流量が一時的に上昇するが、その後（約 80 秒後）、3 ループとも約 260m³/h に一定制御されることから、ループ間には流量差は現れていない。

主流量と ACS 流量の記録データの差から求めた SG 側への Na 流量は、OHP8 左上図に示すように、主流量の記録データの差異が影響し、ループ間で差異が生じたように窺わせている。一方、SG 入口止め弁バイパス弁の下流には弁開度設定のための流量計が設けられ約 6 時間ごとに流量計測される。試験前と試験後約 5 時間の記録データは、配管長が短い B ループは主流量の記録データと同様に若干高いものの、A と C ループの間で流量差は生じていない。

以上のことから、トリップ時の SG 側から ACS 側へ流路切り替え以降には、何らかの影響（発表では自然循環力等と言いました）により、A と C ループで流量差が生じた可能性があることを推定した。

2. 蒸気発生器入口止め弁バイパス弁の開度（SKS 補助冷却設備流調機能確認試験 at 200℃）は、各ループとも流量 38.7±1.9m³/h を満足する、B および C ループは弁開度 72%、A ループは 68%と設定された。したがって、微小な弁開度差がトリップ後の A および C ループの流量に差の要因としても否定はできない。

質問・要望シート

<質問・要望事項等>

「プラント熱過渡裕度評価」に関する質問

OHP8（40%タービントリップ試験解析）について

3. 蒸発器ナトリウム試験流量 C ループの値は、B ループの値の約半分だが、それでも右側の蒸発器出口温度の図に見るように B、C ループの蒸発器出口温度変化は同じであるか。
4. 蒸発器ナトリウム流量 B ループの蒸発器出口温度解析結果は右側の蒸発器出口温度の図に見られないが、C ループの解析結果の上であったと考えて良いか。

<回答>

3. OHP8の左上図に示す SG 側への Na 流量は、上述したとおり主流量計測の誤差の影響が大きく、C ループ流量は実際には B ループ流量の半分であったかはわからないが、若干ではあるが C ループは少なかったことは推察される。なお、B と C ループの出口蒸気温度変化の試験結果は、ほぼ同じ挙動を示した。

4. B ループの試験条件による解析は実施していない。

以上のことから、発表時の質疑でも回答したように、A ループ出口蒸気温度低下の要因として、トリップ時の SG 側への Na 流量、出口蒸気圧力変化のループ間の差異が主たる要因として解析からも推定された（解析からも A ループ流量は少なかったと推定した）。そこで、次期性能試験において、比較的に実施可能な熱過渡緩和方策として、SG 側への Na 流量を増加させることを示した。なお、実施にあたっては、トリップ時の SG 側への Na 流量がループ間で差異が生じているか、まず確認を行い、実施していくこととしている。

質問・要望シート

<質問・要望事項等>

「タギング法破損燃料検出装置の改良の検討」に関する質問

1. OHP No. 5によるとタグガス回収装置 A とタグガス回収装置 B が並列に設置されているように見えるが、どのように使い分けるのか。
2. フェニックスでは 45 分で破損燃料の同定が可能ということだが、もんじゅでも同様のことができないか。

<回答>

1. タギング法破損燃料検出装置のタグガス回収装置 A と B は、同一仕様であり、タグガス回収装置 A とタグガス回収装置 B は交互に運転をしながら連続して^{注)} タグガスを回収する。

注) タグガス回収装置の交互運転 (—→ : 1 次アルゴンガスの流れ)

タグガス回収装置 A: 回収運転 ⇒ 加熱・再生運転 ⇒ 回収運転・・

タグガス回収装置 B: 待機 ⇒ 回収運転 ⇒ 加熱・再生運転・・

2. フェニックスでは、破損燃料位置決め設備としてセレクトバルブ法により破損燃料の同定を行う。この方式はタグガスの回収分析を行う「もんじゅ」より、短時間で分析を行うことができる。セレクトバルブ法は、燃料集合体の上にサンプリング用の配管を設置し、その下流にセレクトバルブを設ける必要があるため、炉上部の構造が複雑となる。

質問・要望シート

<質問・要望事項等>

「冷却材ナトリウムの迅速分析法の検討」に関する質問

コールドトラップには時間と共に不純物が蓄積されるので、コールドトラップを(定期的に)交換するのか。

<回答>

1次系

コールドトラップは2機設置されており、閉塞したと判断された場合（純化系の流量低下・圧損上昇）には予備機に切替えられる。

なお、閉塞した方は、メッシュ部を加熱することにより捕獲不純物を分離し、ドレンタンクへ排出させ、予備機として待機させる（加熱再生）。

2次系

A、B、C各グループ毎にコールドトラップは2機設置されており、閉塞したと判断された場合（純化系の流量低下・圧損上昇）には予備機に切替えられる。

なお、閉塞した方は、新規のコールドトラップと交換する。

Ⅲ.第 13 回もんじゅ・国際技術センター技術報告会 発表資料

日時：平成 16 年 3 月 10 日（水）10:00～16:40

場所：核燃料サイクル開発機構 敦賀本部 もんじゅ国際技術センター情報棟 エムシースクエア
（住所：福井県敦賀市白木 1 丁目，TEL：0770-39-9222）

<プログラム>

司会進行役：もんじゅ建設所 技術課長 高山 宏一

（１）開会の挨拶 10:00～10:10
もんじゅ建設所 所長 伊藤 和元

（２）事務連絡 10:10～10:15

（３）報告
座長：国際技術センター 次長 榊原 安英

特別発表：雷雲中における放射線発生機構に関する研究 10:15～10:55
社内公募型研究推進室 鳥居 建男

セッションⅠ：もんじゅの特性評価と供用期間中検査技術開発

① 「仏国ERANOSシステムによる
「もんじゅ」炉心臨界性解析」 10:55～11:20
国際技術センター 炉心技術開発 Gr. 影山 武

② 「プラント熱過渡裕度評価」 11:20～11:45
国際技術センター システム技術開発 Gr. 山田 文昭

③ 「蒸気発生器伝熱管 E C T センサの開発」 11:45～12:10
国際技術センター ISI システム開発 Gr. 椎名 章

④ 「伝熱管 E C T 用プローブ搬送挙動とノイズ」 12:10～12:35
国際技術センター ISI システム開発 Gr. 今井 義之

[昼食 12:35～13:25]（国際技術センター研究棟 第 1 会議室）

座長：もんじゅ建設所 次長 谷川 信吾

特別講演：「日本の原子力開発と国際的役割」（仮題） 13:25～14:15
原子力委員会 町 末男 委員

セッションⅡ：もんじゅの信頼性向上に関する技術開発

① 「「常陽」MK-Ⅲの性能試験結果」 14:15～14:55
大洗工学センター 実験炉部 技術課 吉田 昌宏

② 「タギング法破損燃料検出装置の改良の検討
ータギング法破損燃料検出装置モックアップ試験結果の概要ー」 14:55～15:20
もんじゅ建設所 技術課 斉藤 裕行

[休憩 15:20～15:35]

③ 「冷却材ナトリウムの迅速分析法の検討」 15:35～16:00
もんじゅ建設所 安全管理課 飯島 稔

④ 「ナトリウム漏えい対策
ー断熱材敷設評価と床ライナの健全性評価ー」 16:00～16:30
もんじゅ建設所 プラント第2課 芋生 和道

(4) 閉会の挨拶 16:30～16:40
国際技術センター 次長 榊原 安英

以上

雷雲中における放射線発生機構 に関する研究

核燃料サイクル開発機構
社内公募型研究推進室
鳥居 建男

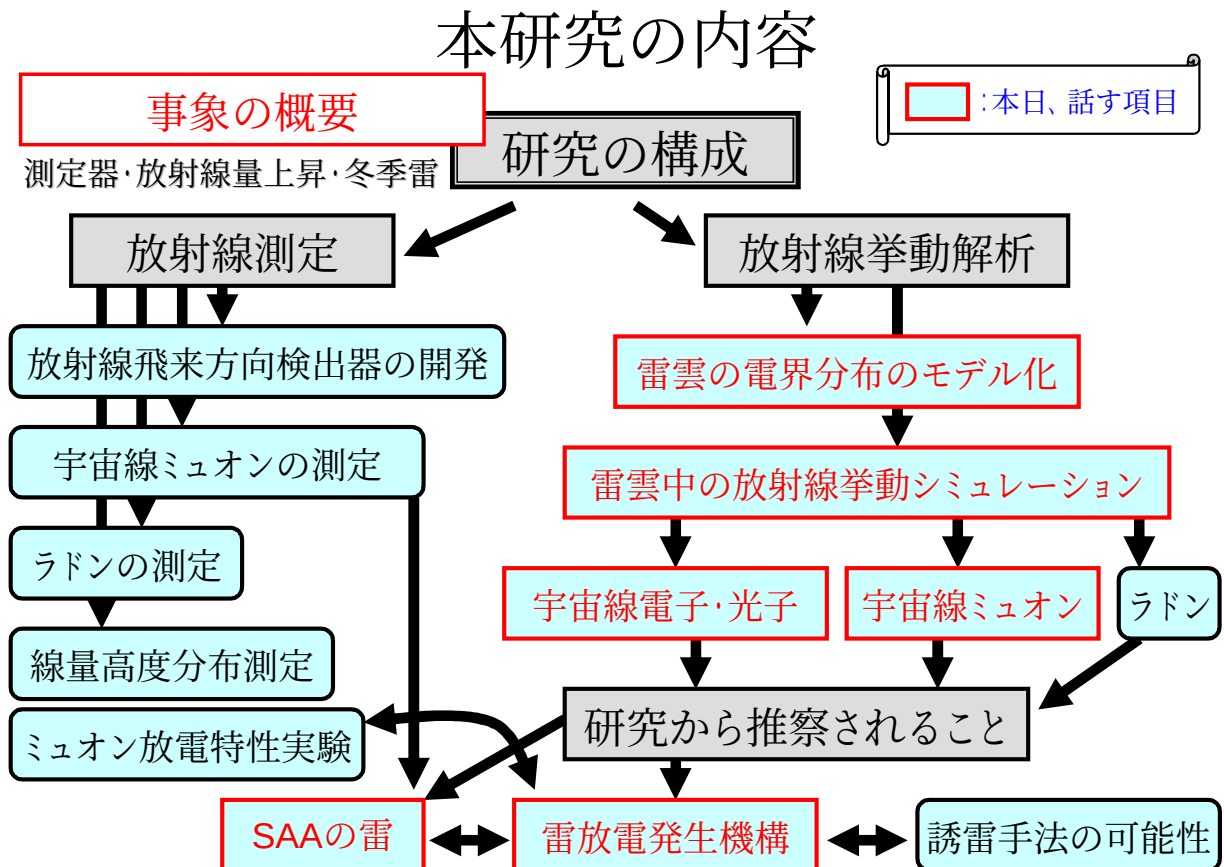
研究の背景

- もんじゅ周辺等において環境放射線測定機器が、
冬季雷活動時に限って通常の変動範囲を大幅に超
える放射線レベルを観測することがある。
- ノイズとは考えにくい事象も観測されることがある。
 - ◆ 環境放射線モニタ (NaI検出器) の指示値上昇
 - 上昇するまでの立ち上がり時間が数10秒
 - 設置位置により上昇開始のタイミングにずれ
 - ◆ 熱ルミネセンス線量計 (TLD) の線量上昇
 - 電磁ノイズの可能性なし(電源を用いない)
 - 設置場所により上昇の度合いに傾向が見られる

研究の目的・目標

雷活動に起因すると考えられる放射線変動
事象の原因を解明する

- 雷活動に伴う放射線変動等の測定調査
 - ◆ 放射線バースト発生時の放射線エネルギー分布等から線源を明らかにする。
- 雷雲中での放射線挙動のシミュレーション
 - ◆ 雷雲を模擬した電界中での放射線挙動を解析するためモンテカルロ計算コードを開発し、放射線バースト発生メカニズムの解明を行う。

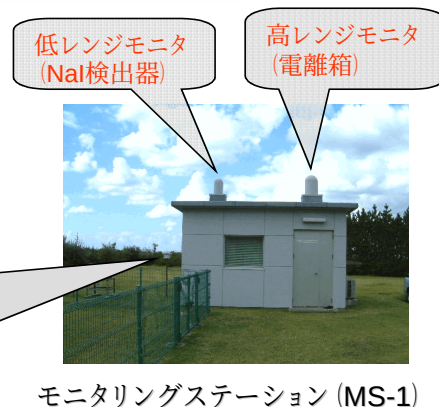
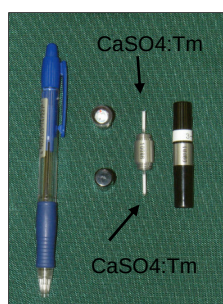
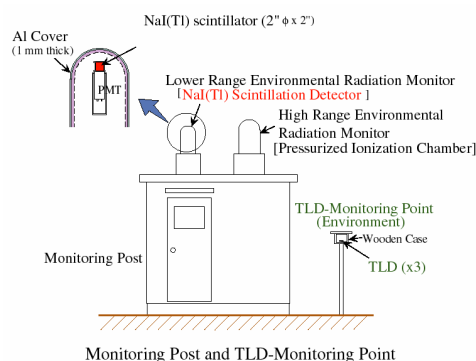


雷活動による放射線測定器の 指示値変動事象

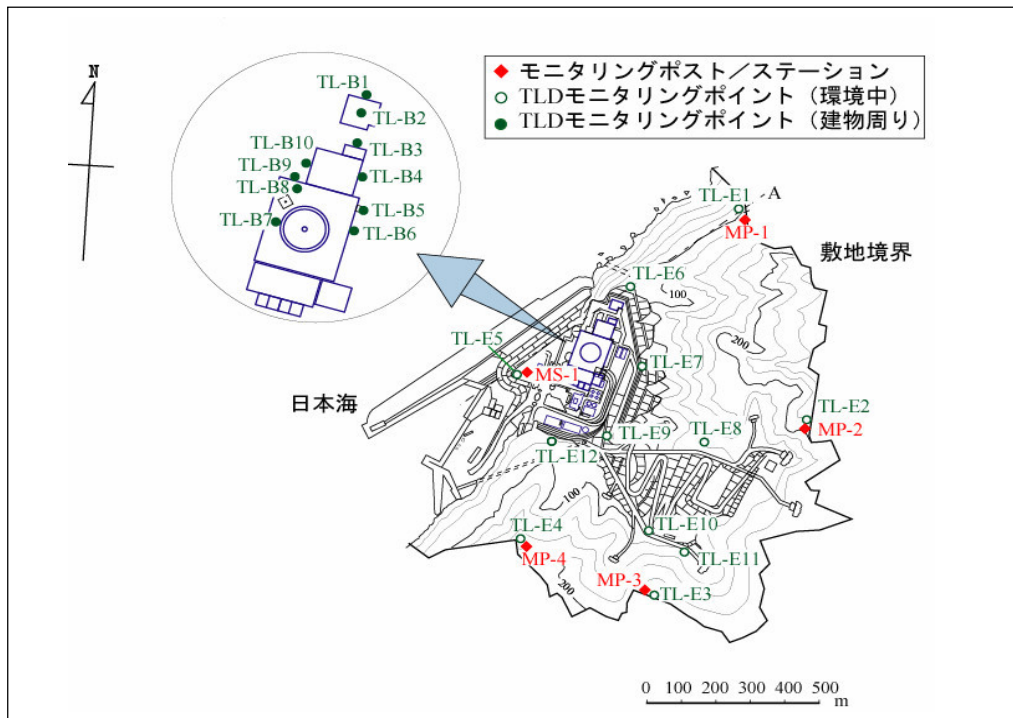
- 冬季雷発生時にのみ発生
- 高レンジモニタ (電離箱検出器) だけでなく、低レンジモニタ (NaI検出器) の指示値も上昇する。
 - ◆ NaI検出器は電磁ノイズの影響を受けにくい
- 平常時と比べて数倍から10倍程度の上昇が多い
 - ◆ 最大は100倍の上昇を示した (1997.1.29)
- モニタの通過率 (エネルギー指標) も上昇する
 - ◆ 高エネルギー側の計数率が多い
- 持続時間は1分程度である
 - ◆ 立ち上がり時間は30秒程度
- まれにTLDも線量上昇を示す

環境放射線測定機器

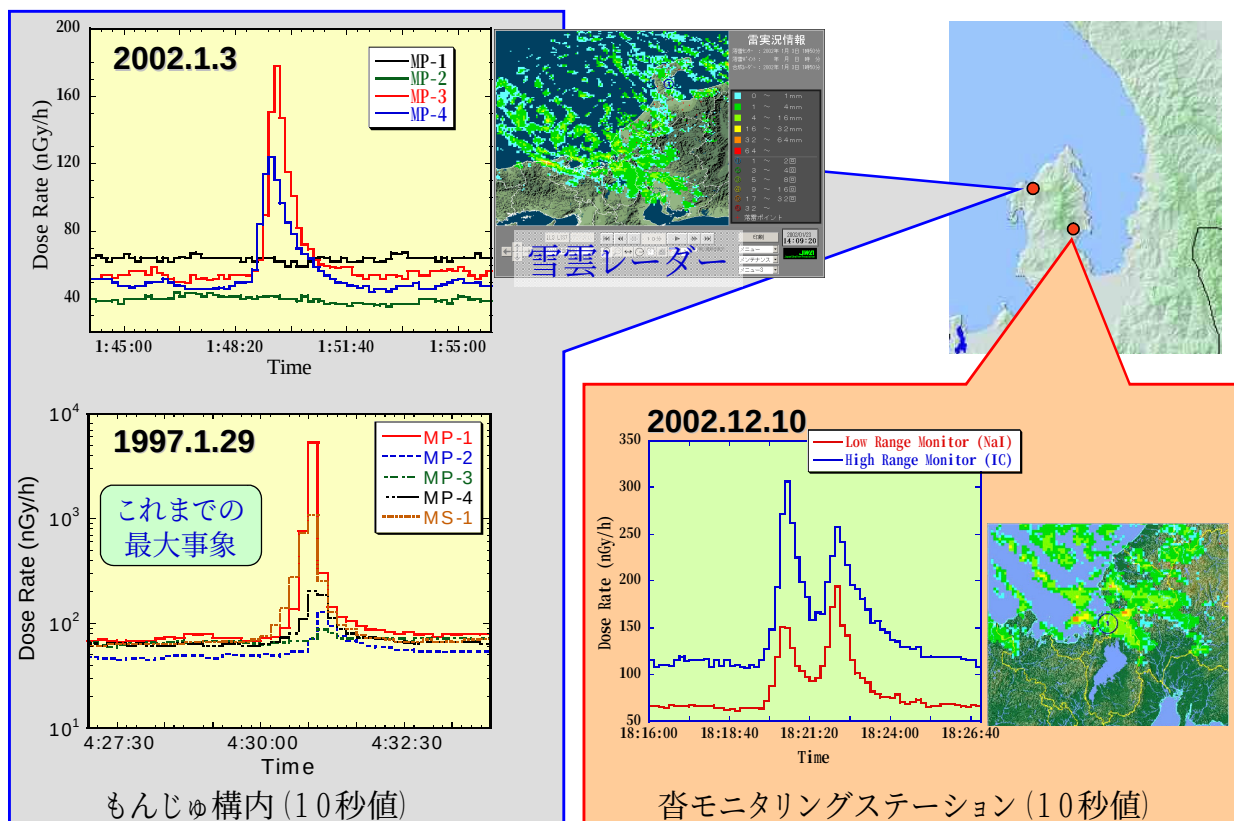
- モニタリングポスト／ステーション
- 低レンジモニタ
2"NaI(Tl) 検出器
- 高レンジモニタ
電離箱 (Arガス充填)
- TLD モニタリングポイント
- TLD素子:CaSO₄:Tm



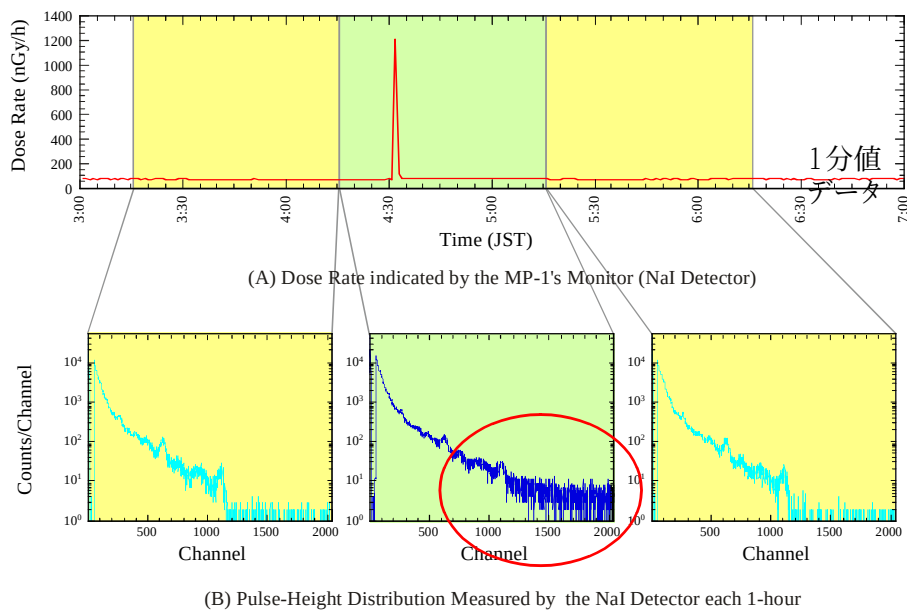
環境放射線のモニタリング地点



これまでの主な観測事例

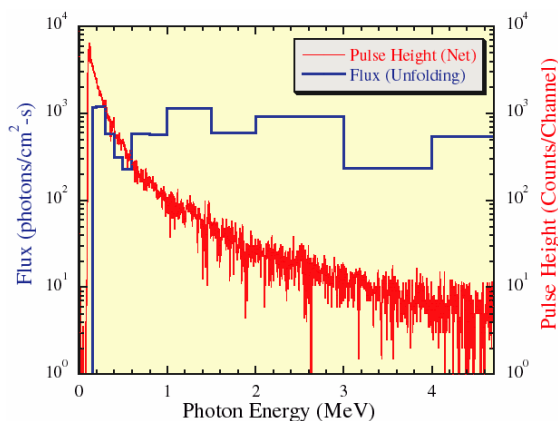


モニタリングポスト1 (MP-1) で観測された 指示値上昇と多重波高分析器 (MCA) の波高分布

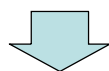


高エネルギー側チャンネルの計数率上昇

波高分布とエネルギースペクトル



連続スペクトル (～数MeV)

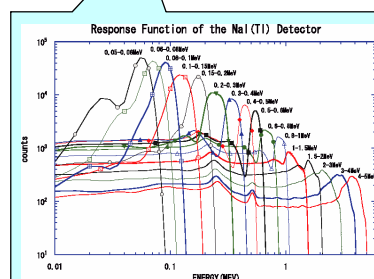


制動放射線？

アンフォールディング計算による
入射エネルギースペクトルの解析

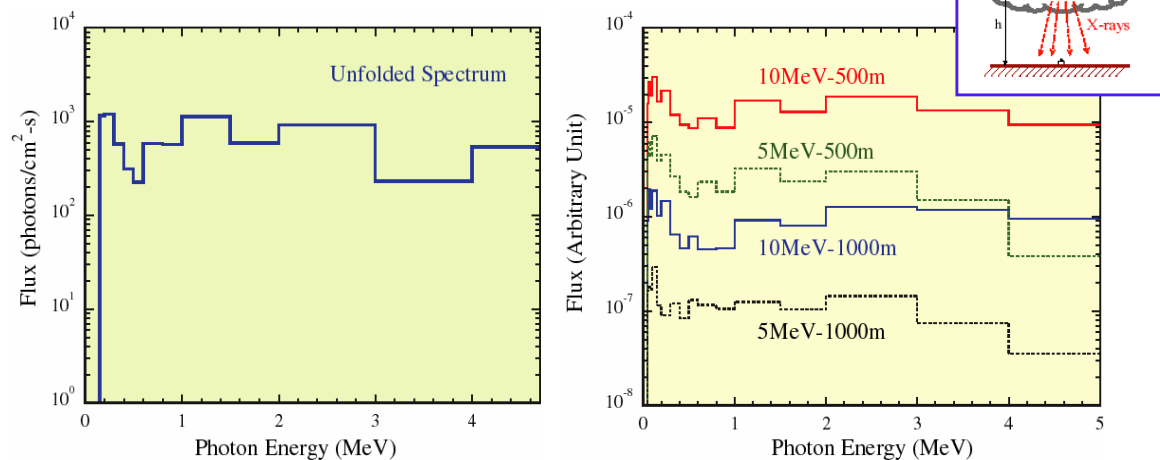
➤ SAND-II コードで解析

$$C_i = \int K_i(E) \phi(E) dE$$



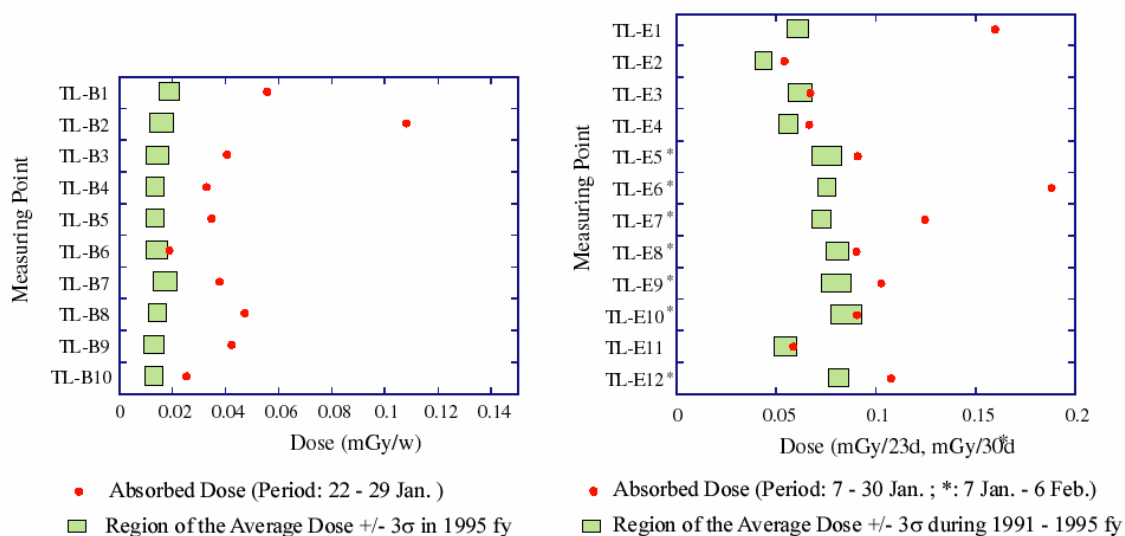
モニタ検出器
の応答関数

アンフォールディング結果と 制動放射線スペクトルの比較



- 上空500m、1000m位置から高エネルギー電子 ($E_e=5\text{ MeV}$, 10 MeV) を下向きに放出させ制動放射線スペクトルを計算
- アンフォールディング計算で求めたスペクトルと類似

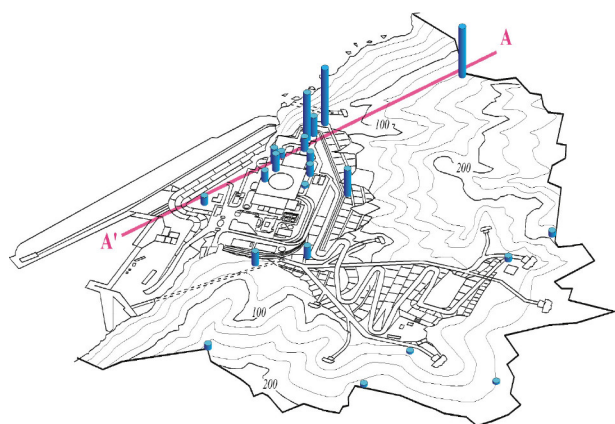
TLDにより観測された吸収線量 と平常の変動範囲 (1997.1.29事象)



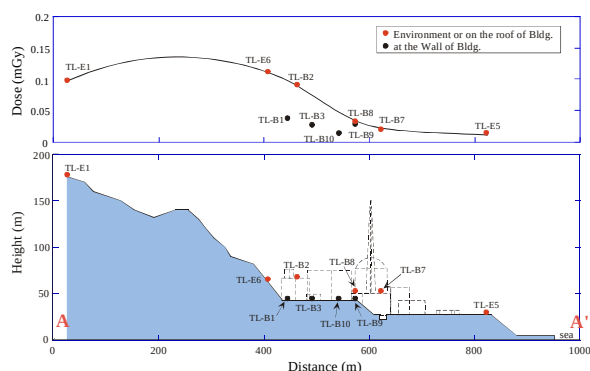
(a) outside of the buildings

(b) environment

TLD線量上昇分の空間分布



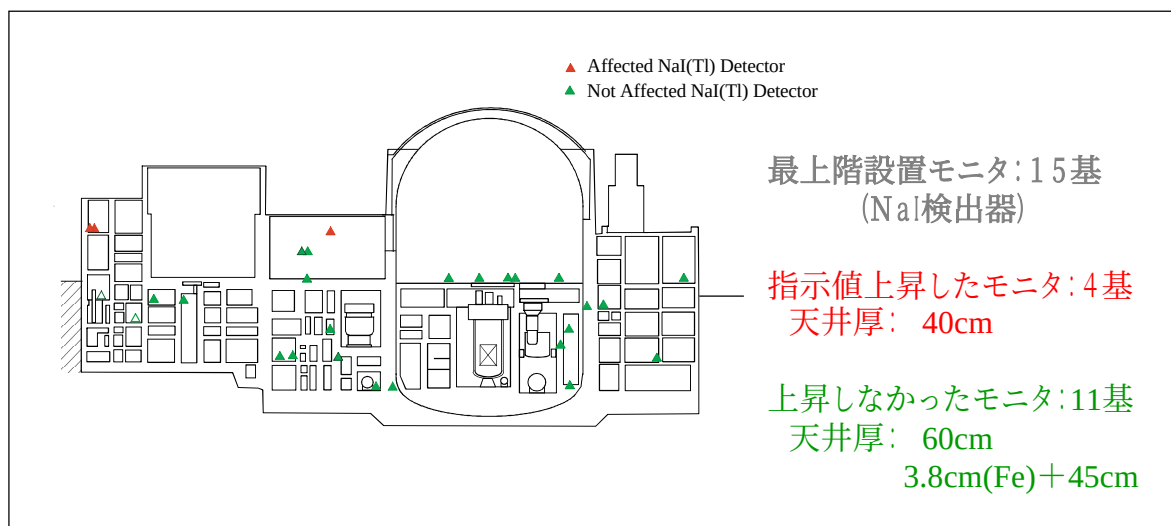
- もんじゅの北東部で線量上昇大
- 南東部、谷間で低い
- 建物屋上の方が側壁 (地上高1.5m) より高い



断面図 (A-A'面) と線量上昇分布

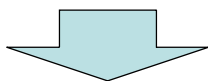
指示値上昇が見られた 建物内放射線モニタ (1997.1.29事象)

影響を受けたモニタ (NaI検出器) は、全て最上階に設置したもの



雷活動時の放射線変動の特徴

- 冬季雷活動時のみに発生
- 個々の雷放電との関係低い
 - モニタ指示値の立ち上がり時間:数10秒程度
 - モニタ位置により立ち上がり開始時間にズレ(10~20秒)
- 上方より放射線入射の可能性
 - TLDの設置位置による違い、建物内モニタの指示値変動
- 影響エリアは数100m程度が多い
 - モニタリングポスト1~3基程度が指示値変動
- 放射線のエネルギーは数MeV程度



雷雲の高電界による荷電粒子加速の可能性

雷雲中の電荷の高度分布

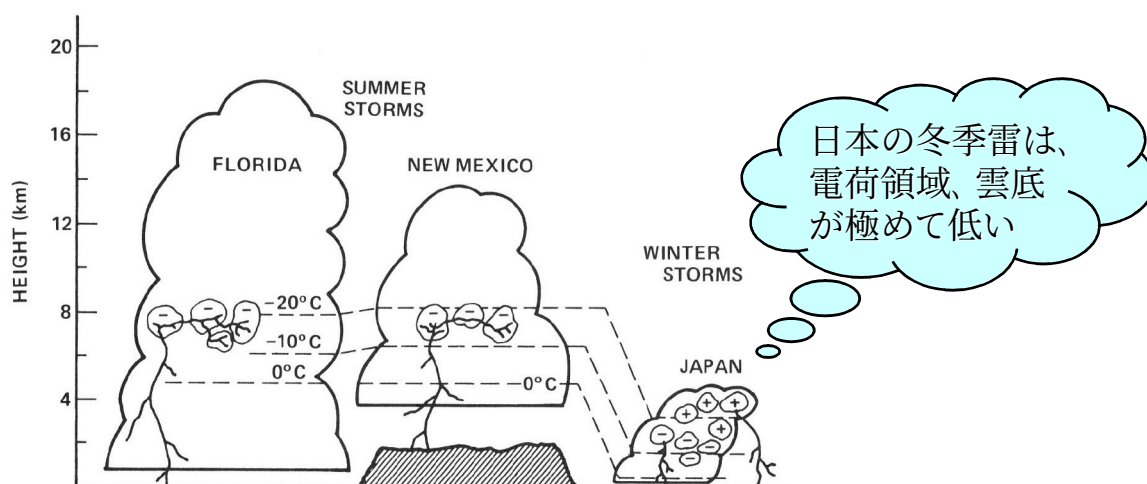


Fig. 3.3 Drawing illustrating the altitude and distribution of ground-flash charge sources observed in summer thunderstorms in Florida and New Mexico and winter thunderstorms in Japan as determined from simultaneous measurement of electric field at a number of ground stations (Section C.7.1) by Krehbiel *et al.* (1983). Note the positive lightning shown in the winter thunderstorm, a common feature of that type of storm (Chapter 11).

Uman, M.A. : The Lightning Discharge (Academic Press, 1987)

冬季雷の特徴

- 雪おこし 日本海沿岸。海岸から35km以内で発生
- 一発雷 突然発生し、その後十数分間も静かな状態続く
- 正極性落雷 夏季雷:負極性90%以上、冬季雷:正極性約1/3?
- 上向き放電で開始する雷 雷放電が高構造物から進展
- 多地点同時落雷 多地点へのほぼ同時落雷が夏季に比べ多い
- スーパーボルト 通常より1, 2桁高い電光。100 C 超の電荷中和
- 水平放電路 雲底をかすめるように地表に平行に伸びる放電路

雷雲中での放射線挙動解析

- 電子・光子輸送モンテカルロ計算コードの開発
 - ◆ EGS4コードへの外部電界ルーチンの組み込み
- 冬季雷雷雲の電界強度分布のモデル化
 - ◆ 実測値 (米国・夏季雷) からの推定
 - ◆ 有限要素法による電界強度解析
- 雷雲中での放射線挙動シミュレーション
 - ◆ 制動放射線の発生挙動の解析
 - ◆ 電子の挙動解析 → 逃走電子の生成、雷放電発生機構
- 宇宙線ミュオンの影響評価
 - ◆ Knock-on電子の影響評価

電子・光子輸送モンテカルロ計算コード (EGS4) への外部電界の組み込み

■ 外部電界による電子の移動

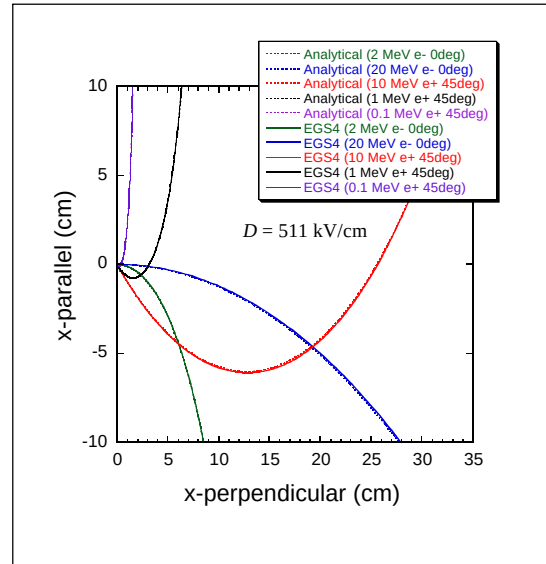
$$\vec{u}_f = \vec{u}_0 + \Delta\vec{u}_{ms,ret} + \Delta\vec{u}_{el},$$

$$\Delta\vec{u}_{el} = \frac{es}{m_0\gamma(E_0)v_0^2}(\vec{D}_0 - \vec{u}_0(\vec{u}_0 \cdot \vec{D}_0))$$

■ 電界中の電子の位置と エネルギーの変位

$$\vec{x}_f = \vec{x}_0 + \vec{u}_0 s + \frac{s}{2}(\Delta\vec{u}_{ms,ret} + \Delta\vec{u}_{el}),$$

$$E_f = E_0 - \Delta E_{ret} + e\vec{D}_0 \cdot (\vec{x}_f - \vec{x}_0)$$



解析式と計算結果の比較 (真空中)

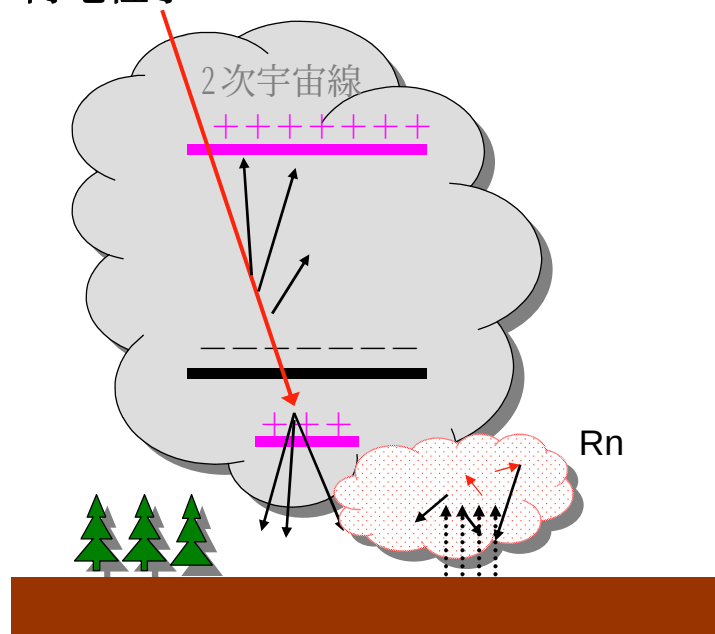
大気中の荷電粒子

雷雲の電界による荷電粒子の加速→制動放射線の発生

考えられるエネルギーの高い荷電粒子

- Rn 子孫核種 (β 線)
≤ 3~4 MeV
- 2次宇宙線 (電子)
数MeV~数10GeV

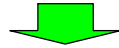
- 2次宇宙線
(ミュオン)
数GeV ≤



雷雲電界中での電子加速と制動放射線の発生

■ 大気中で自由電子が加速される条件: $\frac{d\vec{p}}{dt} = e\vec{E} - F(\rho(z), \vec{p}) > 0$

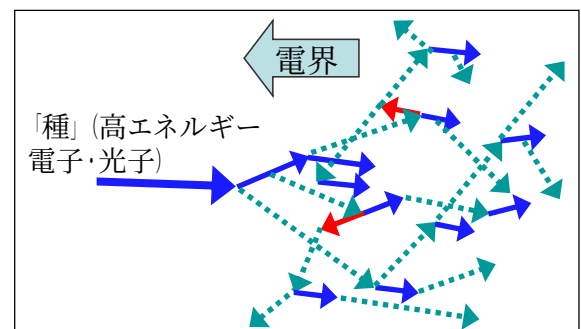
- ① 上式を満たす高電界が、数百メートル以上の距離にわたって分布
- ② 「種」となる高エネルギー荷電粒子・光子 (X・γ線) が存在



高エネルギー電子の加速＝逃走電子の生成
電子・光子のなだれの増加現象＝電磁シャワーの発生

• 考えられる「種」

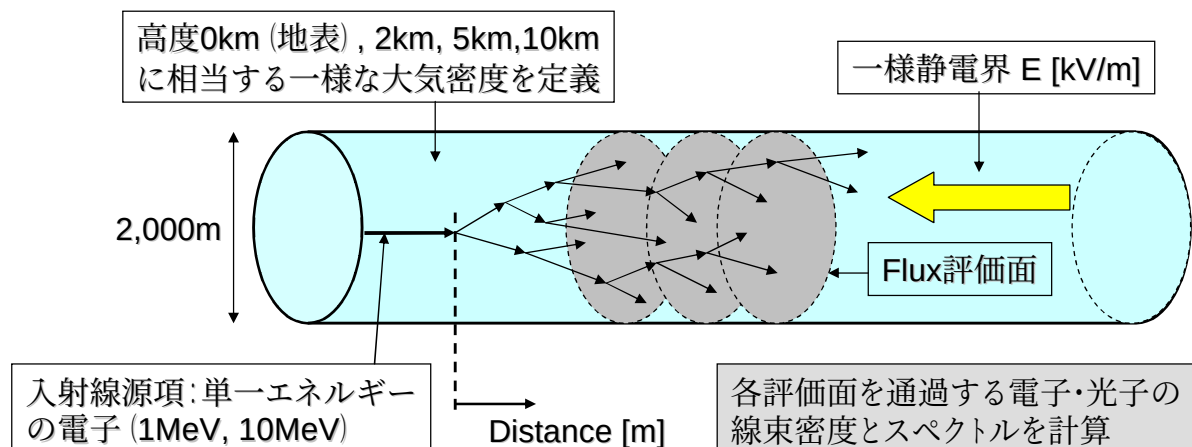
- ① 2次宇宙線 ($e^\pm$, γ , $\mu^\pm$)
- ② Rn子孫核種の崩壊 (β 線・ γ 線)



一様電界中での制動放射線の強度変化

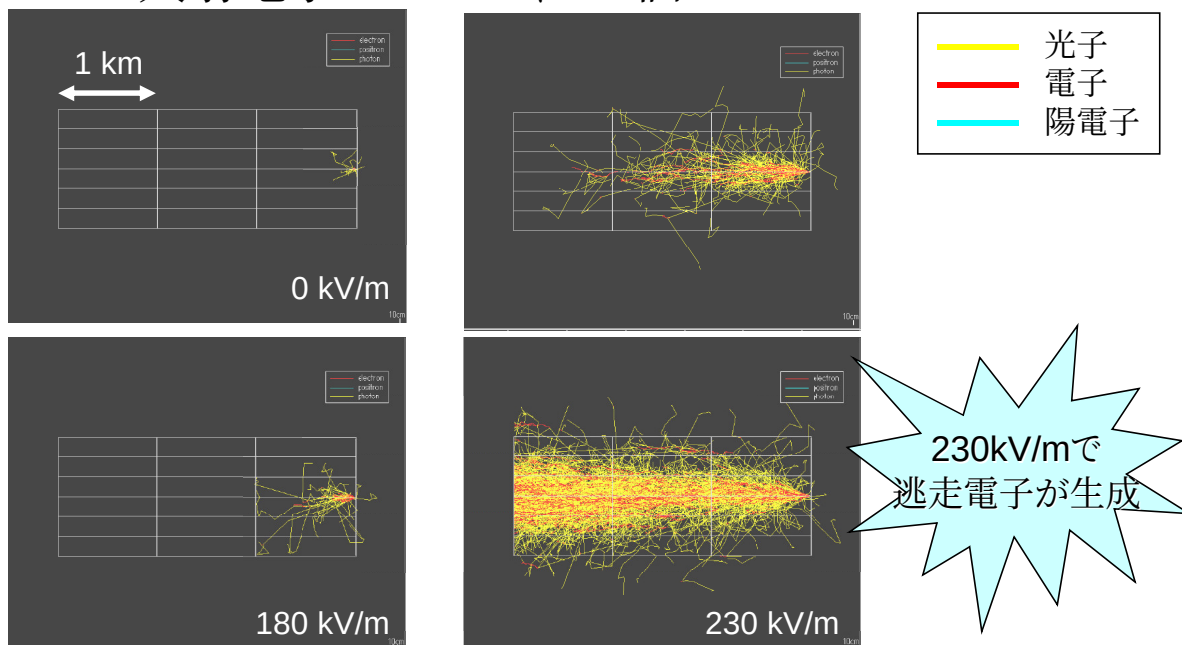
■ シミュレーション (モンテカルロ計算) の概要:

一様電界を印加した一定密度の大気中に、単一エネルギーの電子を入射させた場合の、電子束・光子束の距離変動を計算。

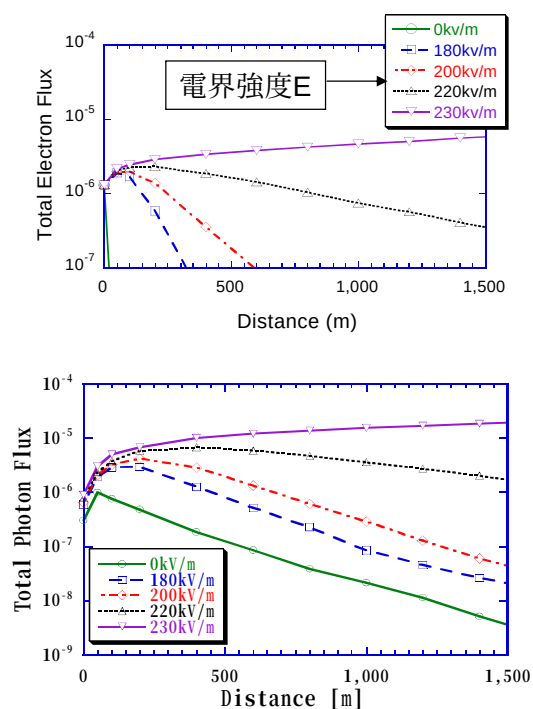


電界中での電子・光子の飛跡

- 高度2km (密度1.0066 kg/m³)
- 入射電子: 10MeV、25個



一様電界中での制動放射線の強度変化



電界強度が下記の値 E_{th} を超えた時、電子・光子のなだれの増加現象が見られた。

高度 z [km]	大気密度 $\rho(z)$ [g/m ³]	E_{th} [kV/m]	$280 \times \rho(z) / \rho(0)$
0	1225	280	280
2.0	1006.6	230	230
5.0	736.43	170	168
10.0	413.51	100	95



高度 z [km]で、高エネルギー電子・光子のなだれの増加現象が発生する最小の電界強度

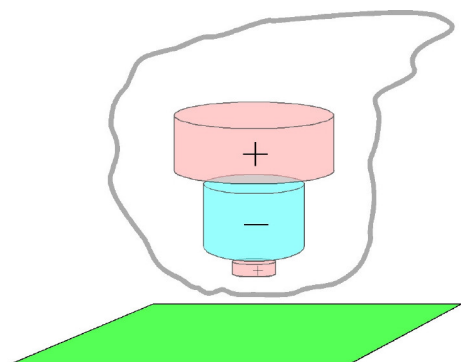
$$E_{th} \approx 280 \times \frac{\rho(z)}{\rho(0)} \quad [\text{kV/m}]$$

逃走電子の生成

電子(上)・光子(下)のフラックス計算結果
(高度2km、入射電子のエネルギー10MeV)

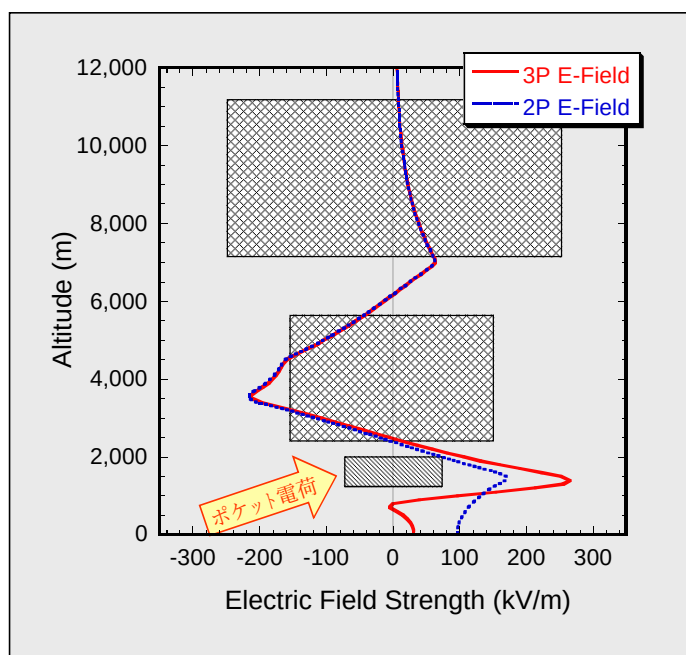
絶縁破壊電界の1/10

冬季雷雷雲の電界分布のモデル化



雷雲電荷のモデル化 (2次元)

有限要素法で電界分布を求める

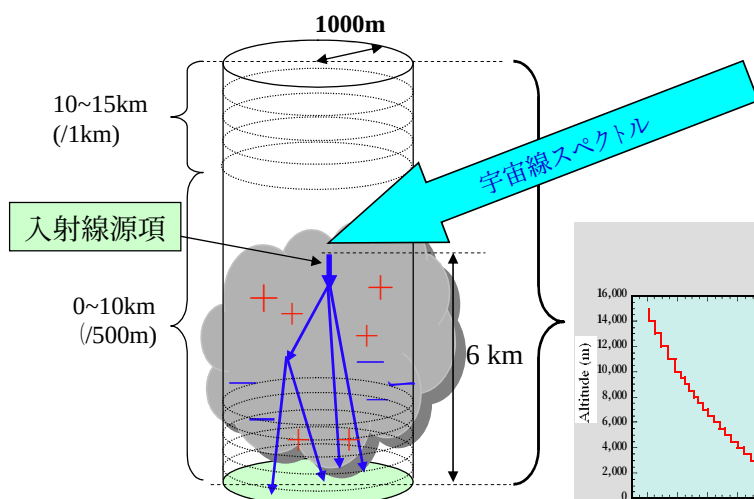


成熟期初期: 3極構造 (3P E-Field)

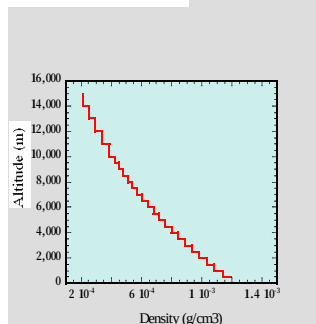
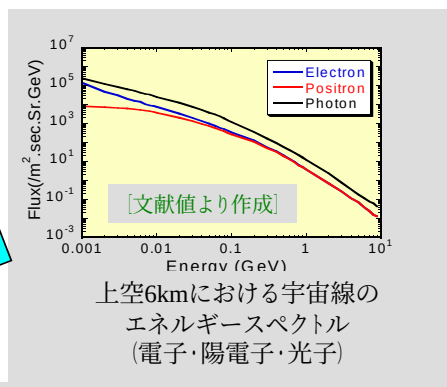
成熟期後期・衰退期: 2極構造 (2P E-Field)

雷雲電界中での制動放射線の下方放出

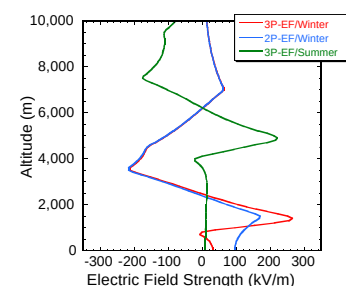
シミュレーションの概要:
雷雲電界中に2次宇宙線が入射した場合の
電子束・光子束の高度変化を計算。



EGS4における雷雲電界および
入射線源 (2次宇宙線) のモデル化

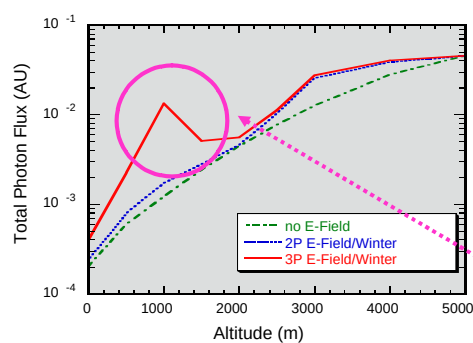


大気密度分布
(US Standard Atmos.)

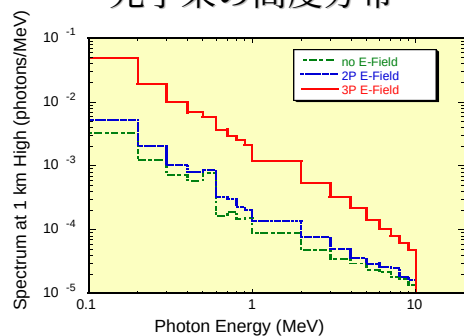


各ゾーンのパラメータとして使用
する電界強度の高度変化の例

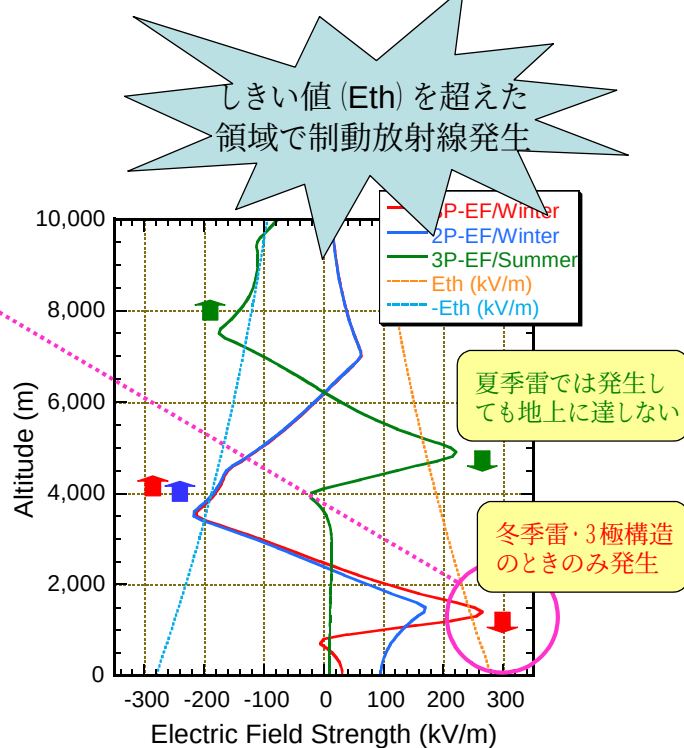
雷雲中での制動放射線と光子束分布



光子束の高度分布

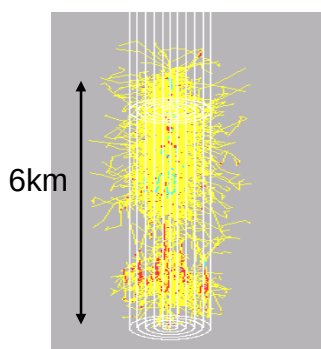


光子のエネルギースペクトル (1km)

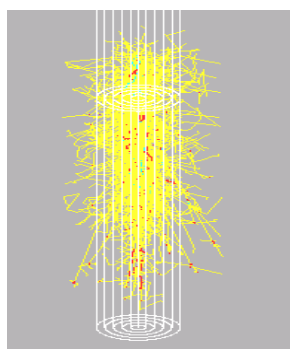


電界強度の高度分布

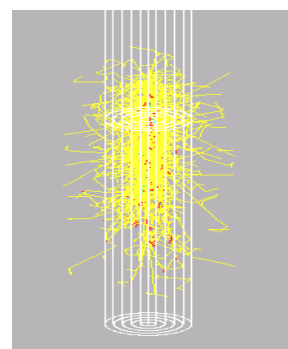
モデル化した雷雲中での放射線の飛跡



冬季雷 (3極構造)



冬季雷 (2極構造)



夏季雷

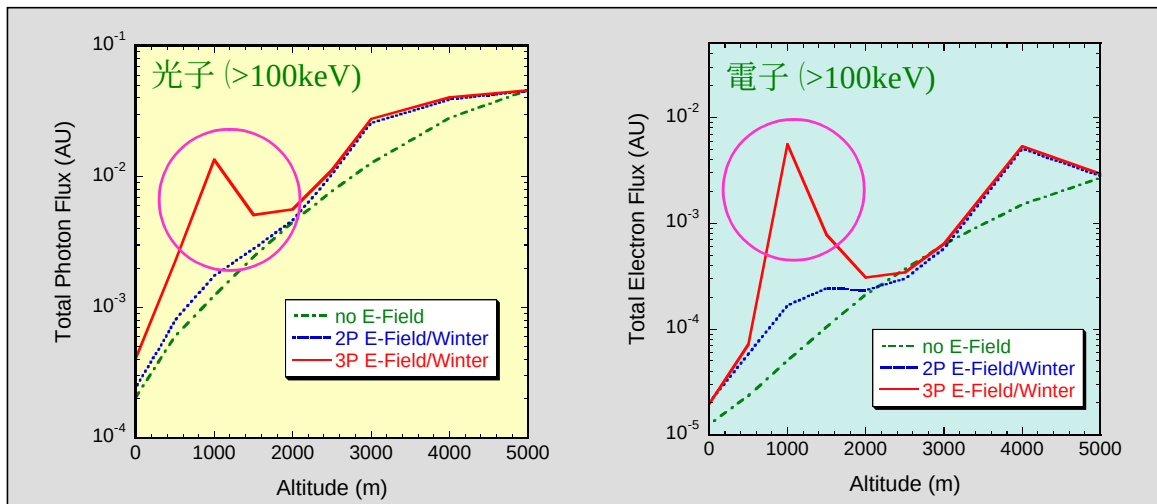
冬季雷 (3極構造) : 地上付近での顕著な上昇が見られる



冬季雷活動時に地上で観測される放射線量率の上昇は3極構造の雷雲 (成熟期初期) の電界分布により発生する

光子束と電子束上昇の比較

ー 線源が宇宙線電子・光子の場合 ー



- 高電界領域で電子束は電界がない場合と比べて2桁の上昇
- 光子束に比べ電子束の方が1桁高い上昇

雷雲中の電界と放電開始

室内実験: 3000 kV/m (平行平板)、 500 kV/m (針電極)

第1表 室内実験による放電開始電界

粒子種類	放電開始電界 (V/m)
水滴	
1.5 mm	1×10^6
2.7 mm	8×10^5
2.7 & 0.65 mm	2.5×10^5
電	$4 \sim 7 \times 10^5$
霰	?
雪片	?

第2表 雷雲内で観測された電界 (Uman, 1987)

Investigation	Typical (V/m)	High values occasionally observed (V/m)	Measurement type
Winn <i>et al.</i> (1974)	$5 \sim 8 \times 10^4$	2×10^5	Rockets
Winn <i>et al.</i> (1981)	—	1.4×10^5	Balloons
Kasemir and Perkins (1978)	1×10^5	2.8×10^5	Aircraft
W. D. Rust and H. W. Kasemir (personal communication)	1.5×10^5	3.0×10^5	Aircraft
Imyanitov <i>et al.</i> (1972)	1×10^5	2.5×10^5	Aircraft
Evans (1969)	—	2×10^5	Parachuted sonde
Fitzgerald (1976)	$2 \sim 4 \times 10^5$	8×10^5	Aircraft

放電開始電界:
~400, 500 kV/m (?)

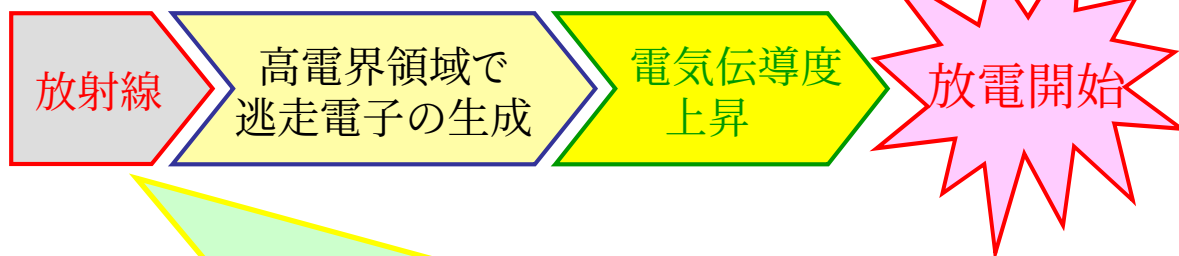


雷雲中の電界:
100~300 kV/m (?)

仲野: 天気, 43, 741 (1996)

雷放電開始への 放射線の寄与の可能性

- 通常の絶縁破壊電圧の1/10で逃走電子が生成



- 2次宇宙線 (電子・陽電子・光子・ミュオン)
 - 特に透過性の高いミュオンからの崩壊電子、Knock-on電子の影響
- Rn (子孫核種) の $\beta \cdot \gamma$ 線

電子束の上昇と放電開始機構への影響

- 高電界領域での電子束密度の急激な上昇
- 高エネルギー電子の発生と吸収

例) 数10 MeV 電子の大気中での吸収
⇒ 100万個のイオン対の生成 (W値: 34 eV/イオン対)

- 雷雲中で観測される電界強度と室内実験とのズレ

観測結果		室内実験
~200 kV/m	↔	400 / 500 ~ 3000 kV/m

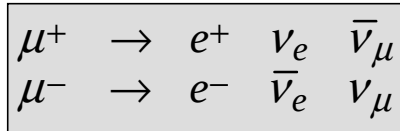
雷雲中での電子・光子なだれ現象が関与の可能性

特に雷雲内の高電界領域へ直接高エネルギー電子を持ち込む宇宙線ミュオンの影響は？

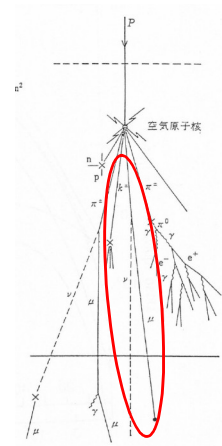
宇宙線ミュオンの影響評価

■ ミュオンの性質

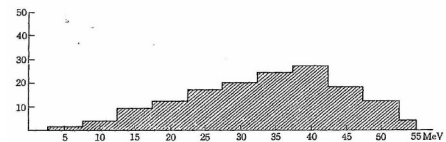
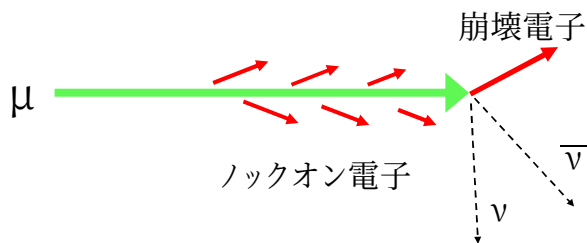
- 質量: 電子の200倍
- 約 2.2 μsec で電子に崩壊する。



- 透過性が高い (高電界領域に到達する)
- 飛行中にノックオン電子を放出する。



宇宙線ミュオンの生成

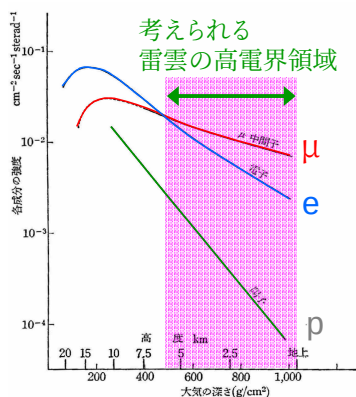


4-4 図 4-3 図の方法で測った $\mu-e$ 崩壊の電子のエネルギー分布。分布は 0 から 55 MeV にわたって広い分布を示しており、このことは $\mu-e$ 崩壊が二体 decay でなく、三体 decay であることを示している。

崩壊電子のスペクトル

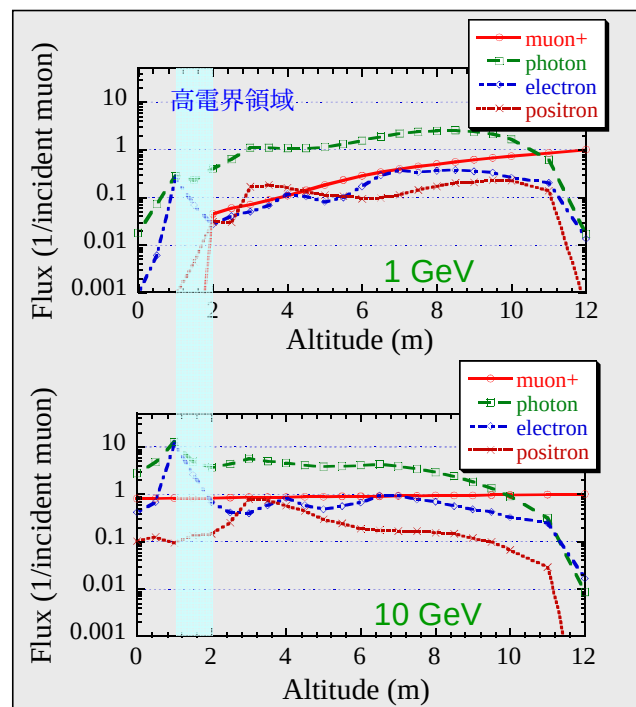
宇宙線ミュオンの影響解析結果

- Geant4コードでのミュオン挙動解析
- 高電界領域で電子・光子束の増加
- ミュオンはほとんど変動なし
- 雷雲中の粒子束から
ミュオンの影響大



1-3 図 宇宙線の陽子成分, μ 中間子成分, 電子成分の強度の高度による変化。

宇宙線粒子束の高度分布

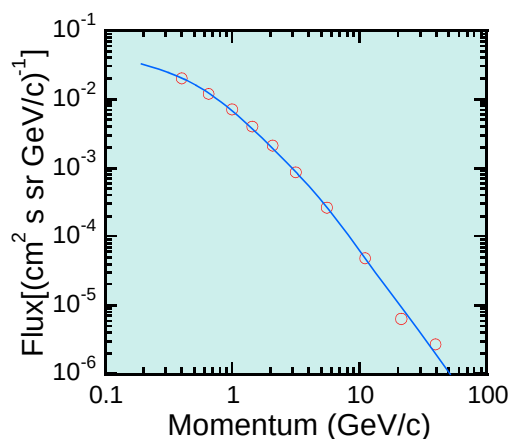


μ^+ を上空12kmから下方に放出した場合
(冬季雷の電界分布を想定)

宇宙線ミュオンの影響解析結果

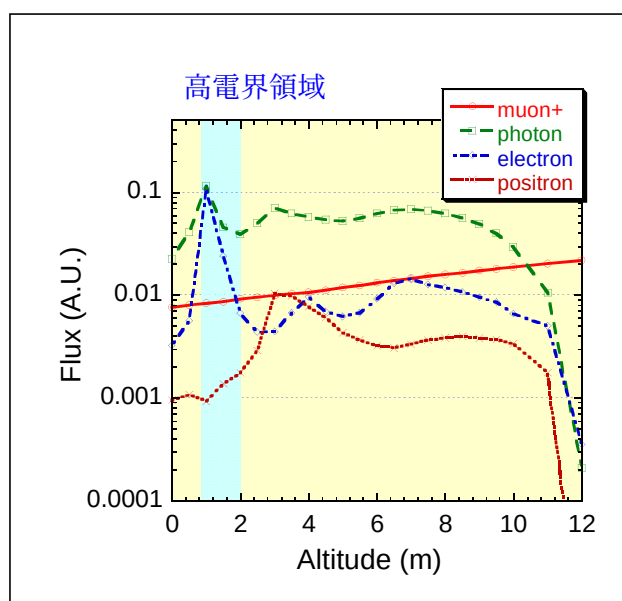
- 高電界領域で電子・光子束の増加
- ミュオンはほとんど変動なし
- 雷雲中の粒子束から

ミュオンの影響大



宇宙線ミュオンのスペクトル

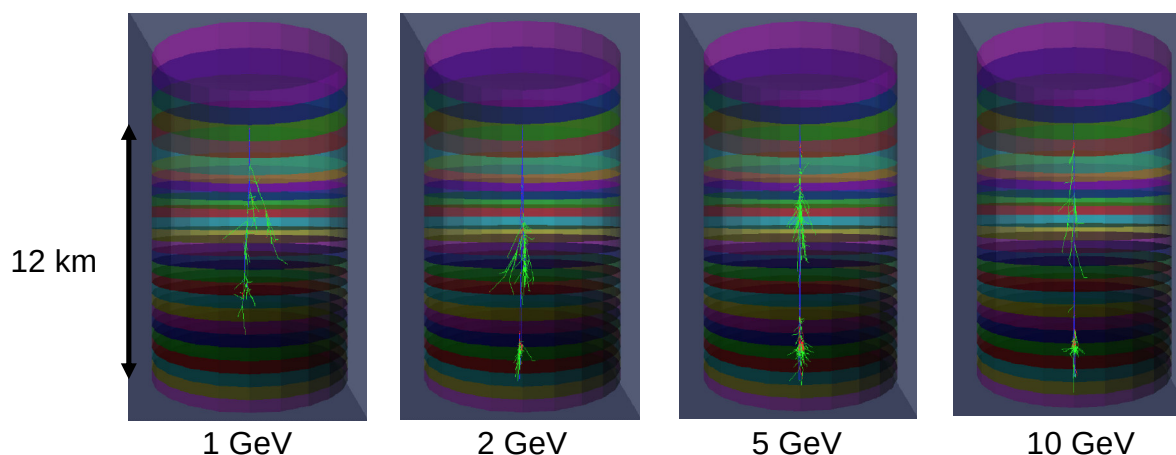
[S. Coutu et al., Phys. Rev. D **62**, 032001 (2000)]



宇宙線ミュオン (μ^+) を上空12kmから下方に放出した場合 (冬季雷の電界分布を想定)

宇宙線ミュオンに起因する放射線の飛跡

上空12 kmから単色の正ミュオン (1, 2, 5, 10 GeV) を
雷雲電界 (冬季雷) 中に放出した場合 (ミュオン数: 5個)



- 入射粒子が電子・光子の場合と同様 (ノックオン電子の影響)。
- 2 GeV 以上のミュオン起因の制動放射線が地上に到達。
- 粒子フラックスを考慮すると影響大。

結 論

- 雷雲の高電界領域 ($\geq$ 約280 P[atm] [kV/m]) で宇宙線光子、電子束の増加が見られ、電磁シャワーの発生により放射線レベルが上昇する。
- 3極構造の冬季雷雷雲電界では、低高度に高電界領域が形成されるため、放射線強度の上昇が地上で観測される可能性がある。 ➡ 夏季雷では、平地で観測される可能性は少ない
- ミュオンの透過性、粒子束を考慮すると、宇宙線ミュオンからのノックオン電子が電磁シャワーの“種”となる可能性がある。
- 高電界領域での電子密度の増加から、2次電子による空気の電離が雷放電のトリガーになっている可能性が考えられる。

自然現象に見られる放射線と雷の関係 《 南大西洋磁気異常帯 (SAA) 》

- ブラジル南部のSAAは地磁気が弱く、宇宙線のミラー高度が低い。
 - ◆ 宇宙線レベルが高いことが予想される。
- ブラジル南部は雷の多発地帯である。

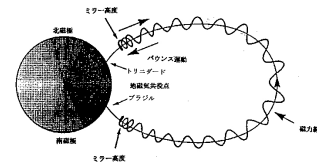
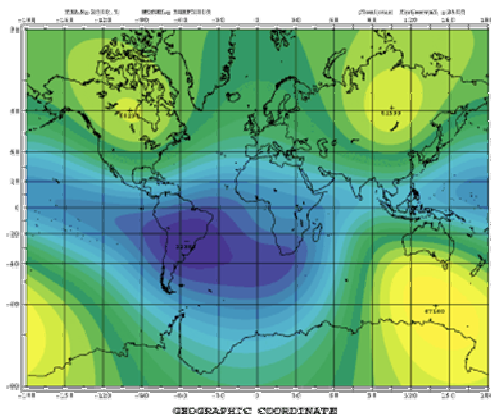


Fig. 1 Cyclotron motion and bounce motion of charged particle along a geomagnetic field line. The mirror altitude indicates the reflection point of bounce motion for a charged particle. The foot of geomagnetic field line in both hemispheres is called a conjugate point. Brazil and Trinidad is corresponding to a conjugate point. (After Deglis et al., 1996)

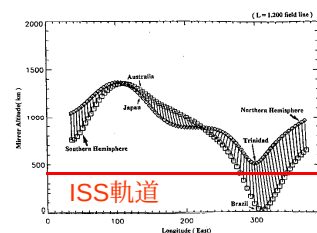
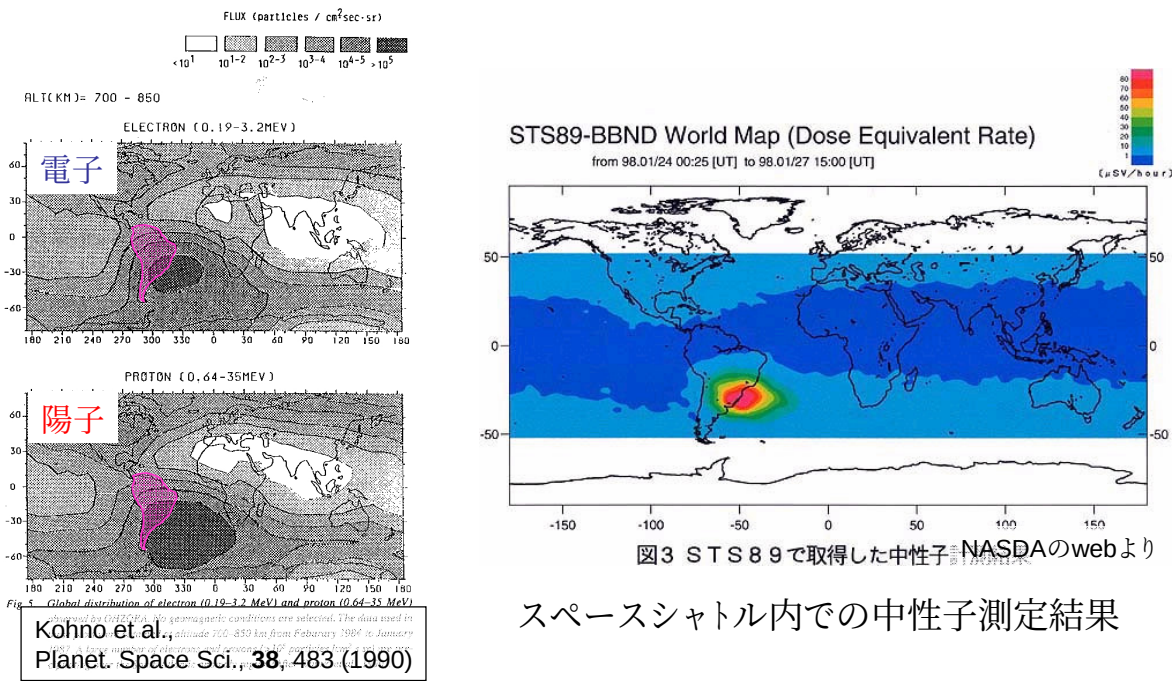


Fig. 2 The mirror altitudes of the northern and southern hemisphere. Conjugate mirror points are connected by a solid line. The mirror altitudes of Brazil and Trinidad are quite different. On the contrary, the mirror altitudes of Japan and Australia are not so different. (After Heyndrickx et al., 1996)

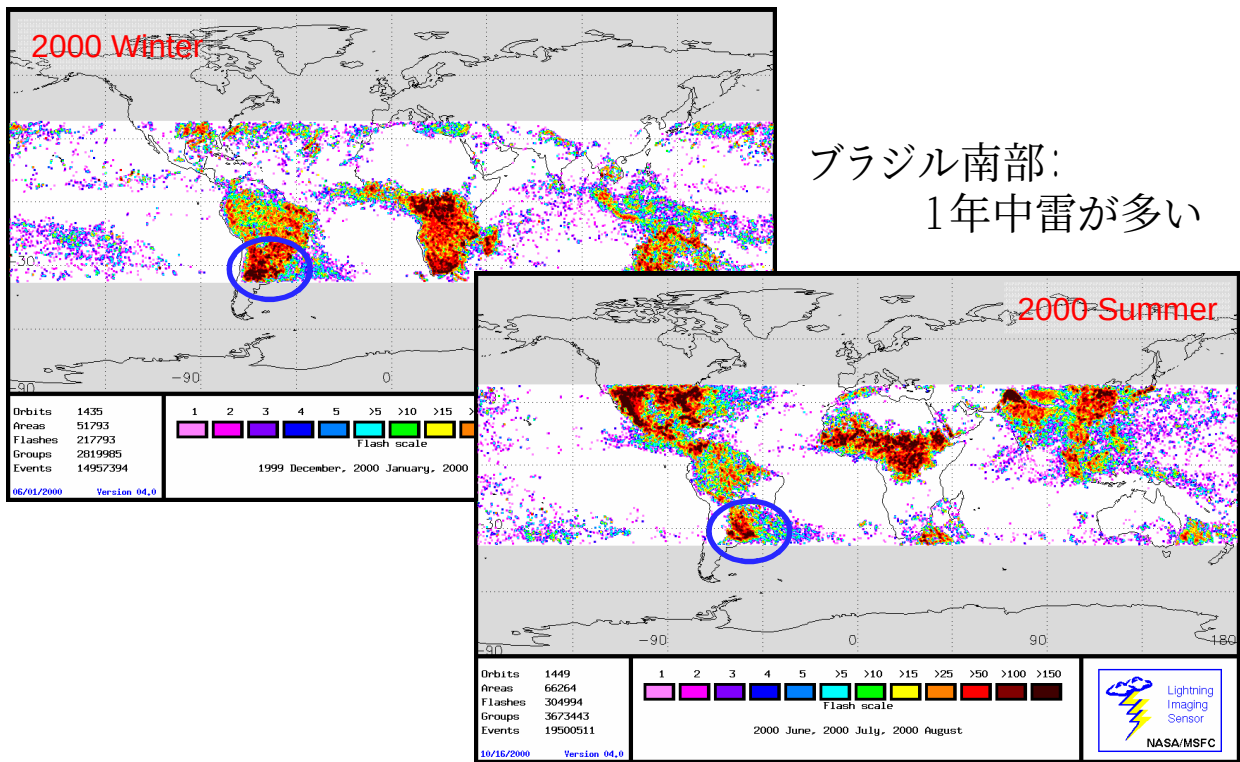
ミラー高度

SAA 域上空での宇宙線強度



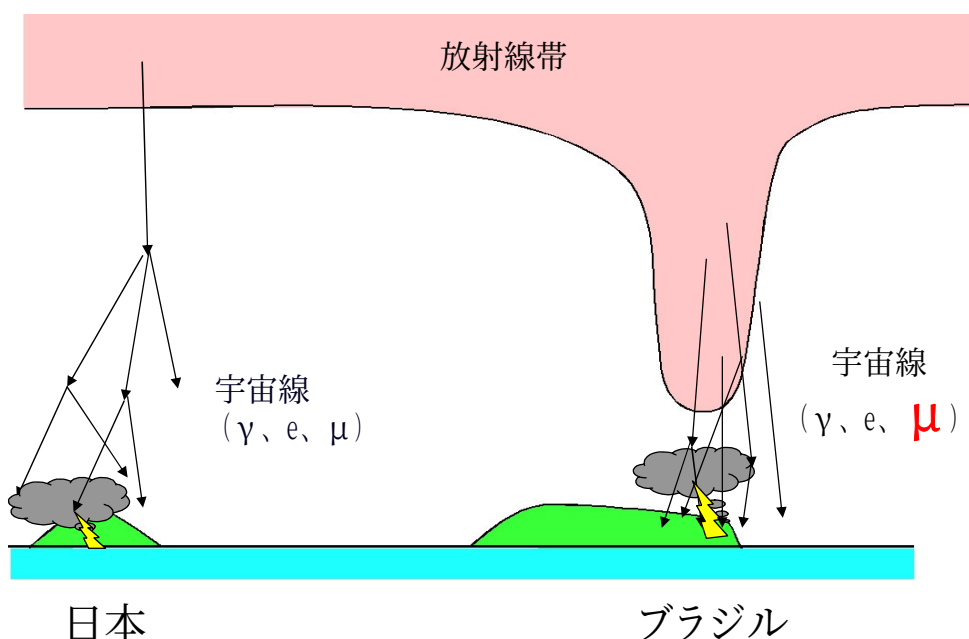
高度 800 kmでの電子・陽子密度

宇宙から見た雷放電



TRIMM衛星のLIS (Lightning Imaging Sensor) 画像

南大西洋磁気異常帯 (SAA) の雷



ブラジル南部の雷: 宇宙線ミュオンに起因していないか?
(ミラー高度: 1,200km (日本)、~60km (ブラジル))

今後の予定

- 放電開始機構の解明
 - ◆ モンテカルロ計算による解析 他
(宇宙線影響、Rnの寄与)
- 誘雷手法のシミュレーション研究
 - ◆ モンテカルロ計算によるミュオン誘雷の可能性研究
(吸収エネルギー → 電気伝導度)
- 観測によるナチュラルアナログ研究
 - ◆ 国内での観測 (もんじゅ構内、乗鞍観測所)
 - ◆ 海外での観測 (ブラジル南部)
- 低エネルギーミュオンを用いた放電特性実験
 - ◆ KEK中間子科学研究施設での放電特性実験



仏国「ERANOS」システムによる 「もんじゅ」炉心臨界性解析

MONJU Criticality Analysis by ERANOS System In the Initial Start-up Core

核燃料サイクル開発機構 敦賀本部

国際技術センター

炉心技術開発グループ

影山 武*

*株式会社 NESI

背景

◆国際技術センターでは、炉心解析手法の高度化による設計余裕合理化の検討を推進中。

→合理的で高性能な炉心の実現

→プラントの経済性向上

◆最新の炉定数や解析手法により、前回性能試験結果を再解析し、現行設計余裕の合理化可能性を検討中。

◆サイクル機構の解析システムとは全く独立した仏原子力庁(CEA)の解析システム「ERANOS」を適用。

→ サイクル機構の結果の信頼性検証と予測精度向上の可能性あり。

目的

- ◆ 仏「ERANOS」システム、サイクル機構の解析システムそれぞれによるもんじゅ初装荷炉心の臨界性解析結果を比較。
- ◆ 「ERANOS」システムのもんじゅへの基本的適用性を確認。
- ◆ サイクル機構の既往解析結果を検証。

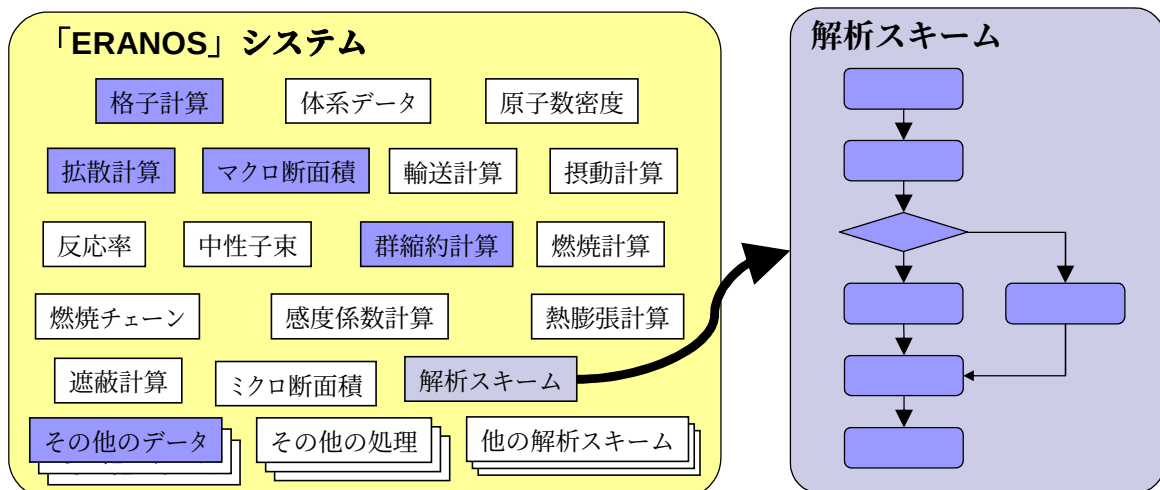
報告内容

- ◆ 「ERANOS」システムとは？
- ◆ もんじゅ初装荷炉心概要
- ◆ 比較対照システムの解析手法
(ERANOS, MEISTER, NSHEX, GMVP)
- ◆ 結果
- ◆ 今後の展開

3

「ERANOS」とは？ その1

- ◆ **E**uropean **R**eactor **A**nalysis **O**ptimized **S**ystem
- ◆ 欧州、米国で開発された炉物理解析コード群を集大成したシステム。
フランス原子力庁 CEAが整備。
- ◆ オブジェクト指向的概念の導入により、「拡張性」「互換性」等に優れる。



4

「ERANOS」とは？ その2

◆Na冷却高速炉のみならず、異なる炉型（ガス冷却炉）、異なる特性（遮蔽計算）への適用が可能。

◆実機への豊富な適用例

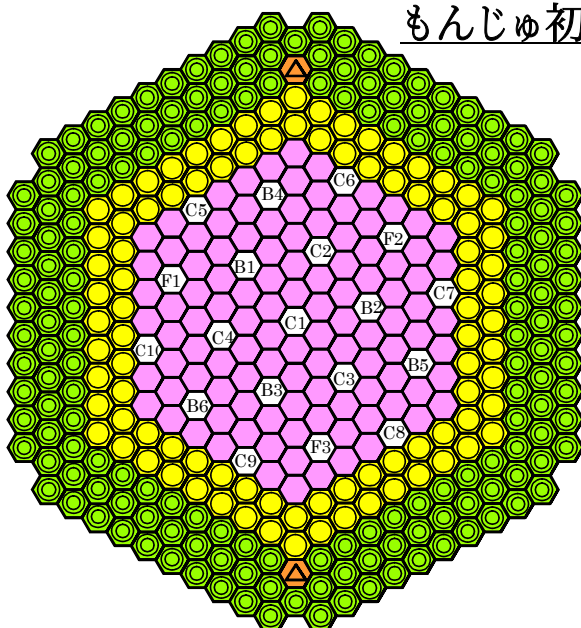
Phoenix、Super Phoenix、MASURCA、ZPPR、常陽

◆従来非公開であったが、昨春、CEA-JNC間でソフトウェアライセンス契約を締結したことにより、サイクル機構内でも「ERANOS」システムが利用可能に。（世界各国20以上の研究機関・大学にも配布中）

→サイクル機構導入後初の試みとして「もんじゅ」初装荷炉心を対象とした臨界性解析を実施。

5

もんじゅ初装荷炉心 基本仕様



- 内側燃料 (108)
- 外側燃料 (90)
- ブランケット燃料 (172)
- 中性子源 (2)
- Cn 制御棒 (粗調整) (10) *
- Fn 制御棒 (微調整) (3) *
- Bn 制御棒 (後備炉停止) (6) *

* 今解析ではNa フォロワ

燃料被覆管外径 [mm]	6.5
肉厚 [mm]	0.47
(材質)	(PNC316)
燃料ペレット外径 [mm]	5.4
理論密度 [%TD]	85
軸方向長さ [cm]	
炉心	93
上部軸ブランケット	30
下部軸ブランケット	35
Pu ^{fiss.} 富化度 (内側/外側) [wt%]	15 / 20

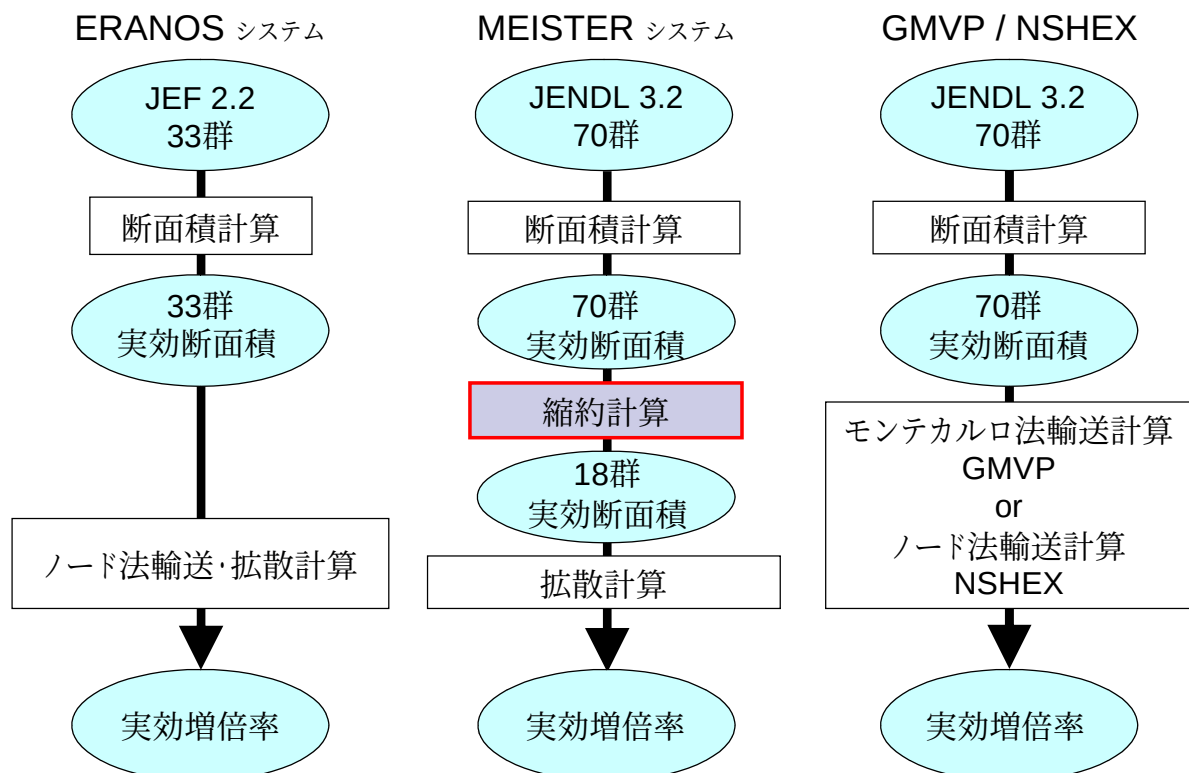
6

各システムの計算手法比較

	ERANOS	MEISTER	NSHEX	GMVP
核データライブラリ	JEF2.2, ERALIB1	JENDL-3.2, ADJ2000R		
核データライブラリの エネルギー群数	1968, 172, 33	70		
炉心計算での エネルギー群数	33	18	70	70
炉心計算理論	輸送、拡散 (ノード法)	拡散 (有限差分法)	輸送 (ノード法)	輸送 (モンテカルロ法)
炉心計算モデル	3次元 六角-Z	3次元 三角-Z	3次元 六角-Z	厳密
径方向メッシュ	6 / 集合体	24 / 集合体	6 / 集合体	厳密

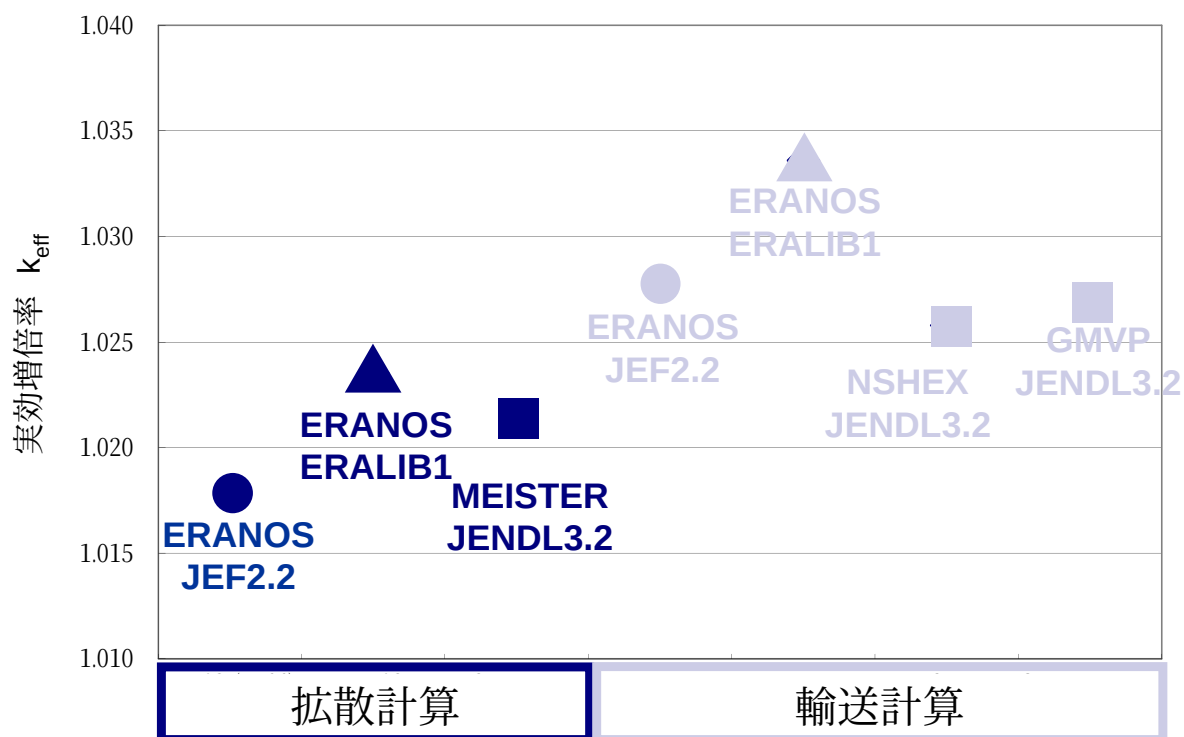
7

各システムの計算フロー



8

計算結果 (補正なし、ノミナル値)



解析コード・核データライブラリ

9

拡散計算結果 (各種補正を考慮)

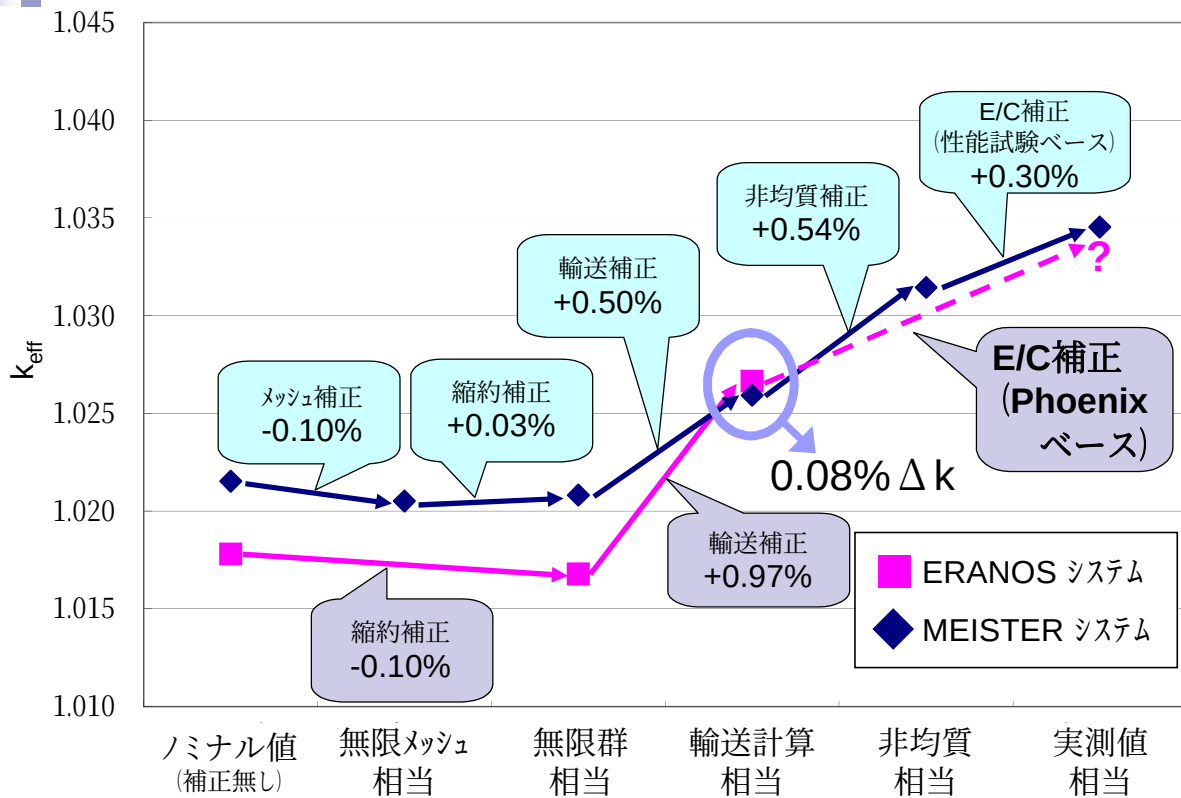
	ERANOS (JEF2.2)	MEISTER (JENDL 3.2)
k_{eff} (補正なし)	1.0178	1.0215
メッシュ補正	-	-0.10% (24メッシュ→無限メッシュ)
エネルギー群縮約補正	-0.10% (33→1968群, ZPPR-9解析より推定)	+0.03% (18群→無限群)
輸送補正	+0.97%	+0.50% (MVP均質 - MEISTER)
k_{eff} (補正済み)*	<u>1.0267</u>	<u>1.0259</u>

*) セル非均質補正と E/C補正は含まず。

-0.08% Δk

参考: ZPPR-9: +0.14% Δk

10



拡散計算結果への各種補正

11

輸送計算結果 (各種補正を考慮)

	ERANOS (JEF2.2)	NSHEX	GMVP
k_{eff} (補正なし)	1.0277	1.0258	1.0270
各種補正	-0.10% (群縮約補正 33→2000群,ZPPR-9解析より推定)	+0.035% (フラックス収束補正)	+0.02% (群縮約補正 70 Gr.→ 無限群)
k_{eff} (補正あり)	1.0266	1.0262	1.0272

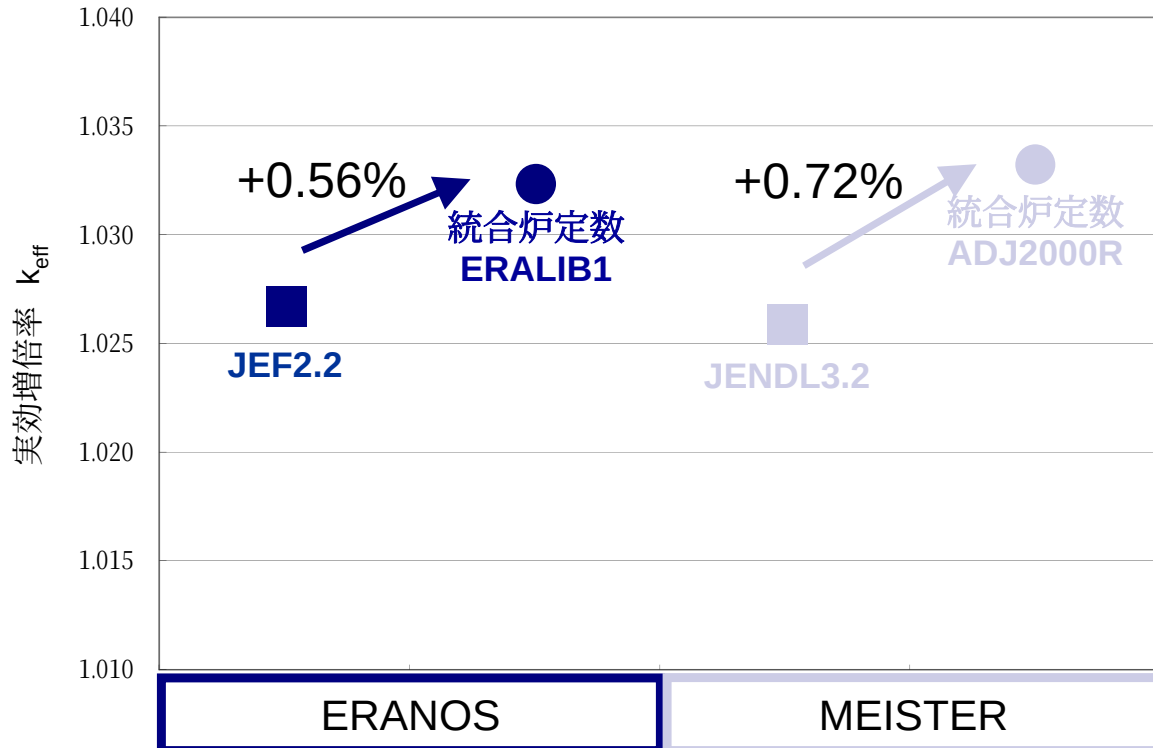
-0.04% Δk

+0.06% Δk

参考: ZPPR-9: +0.30% Δk

12

実効増倍率の統合炉定数効果 (拡散、補正済み)



核データライブラリー、解析コード

13

まとめ

- ◆もんじゅ初装荷炉心を対象に、「ERANOS」システムとサイクル機構の解析システムの臨界性解析結果を比較。
- ◆その結果、両システムは核データライブラリーや計算モデルに違いがあるものの、**実効増倍率は0.1% Δk 以内の精度で一致。**
- ◆このことから、
「ERANOS」システムのもんじゅへの適用性を確認。
サイクル機構の既往解析結果の信頼性が向上
- ◆更に、汎統合炉定数ERALIB1の適用結果がサイクル機構の同ライブラリーADJ2000Rの適用と同等の傾向を示す事を確認。

14



今後の展開

- ◆詳細体系を用いた炉心計算

(例： 2次元格子計算、マクロセルモデル、詳細群断面積等)

- ◆各種炉心特性値の確認

(例： 線出力、集合体出力、制御棒価値、ボイド・ドップラ反応度等)

- ◆Phoenix解析により算出されたERANOSのE/C補正値を適用し

たもんじゅ臨界性解析の評価

- ◆制御棒非均質効果の比較検討 (日仏協力テーマ)

→「もんじゅ」炉心特性予測精度の向上



プラント熱過渡裕度評価

核燃料サイクル開発機構 敦賀本部

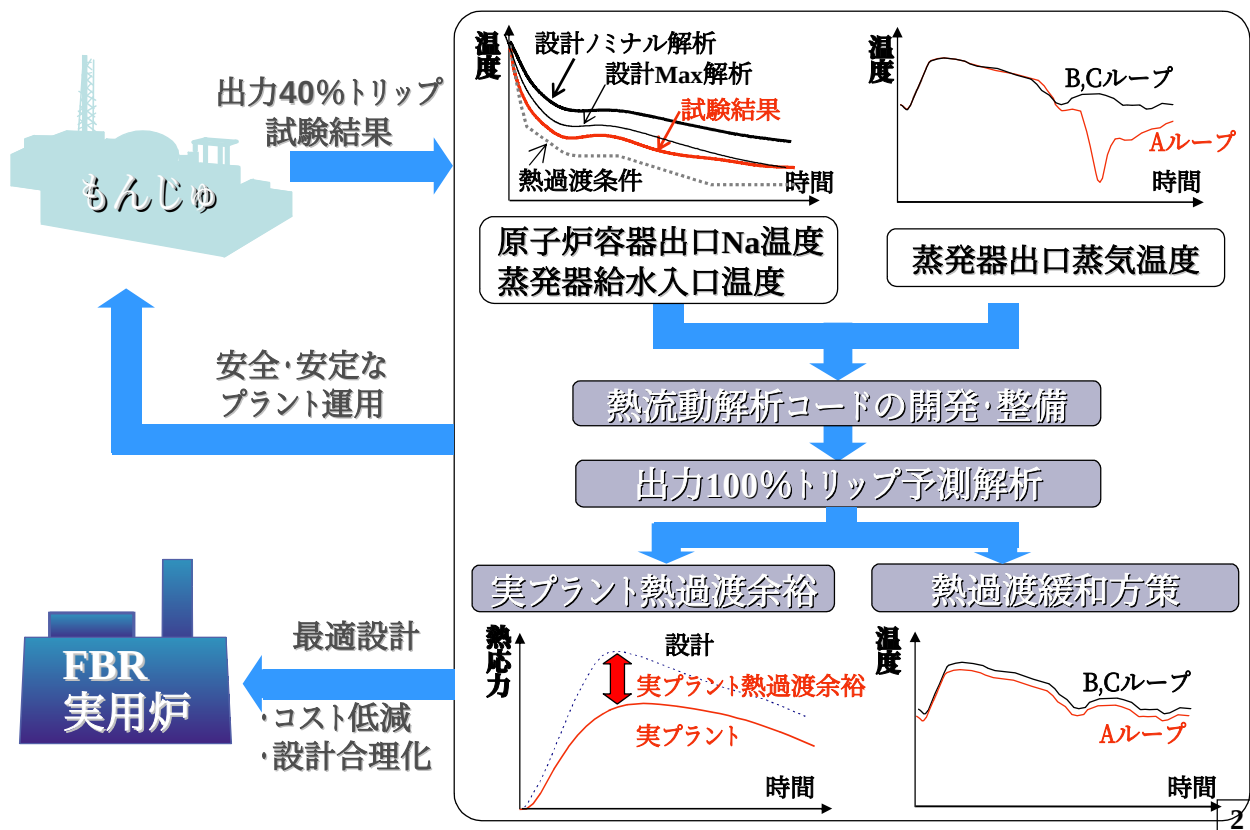
国際技術センター

システム技術開発Gr

山田 文昭

1

目的・方法



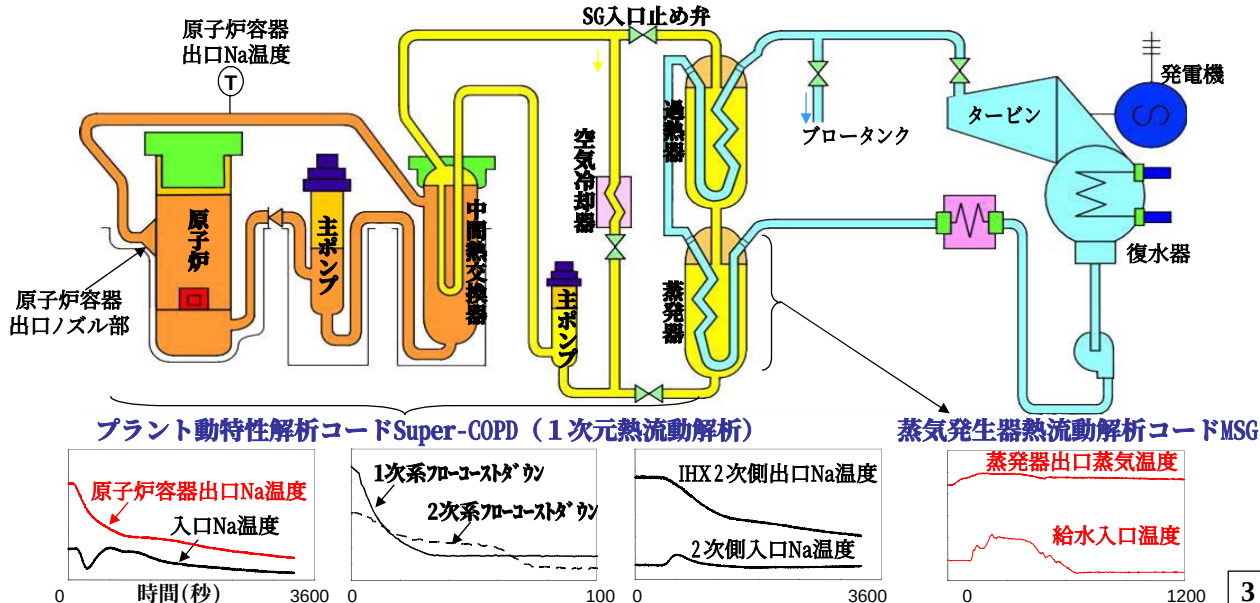
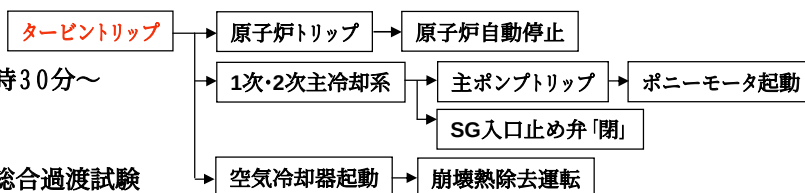
2

試験概要・熱流動解析コード

・試験日 :平成7年12月1日13時30分～

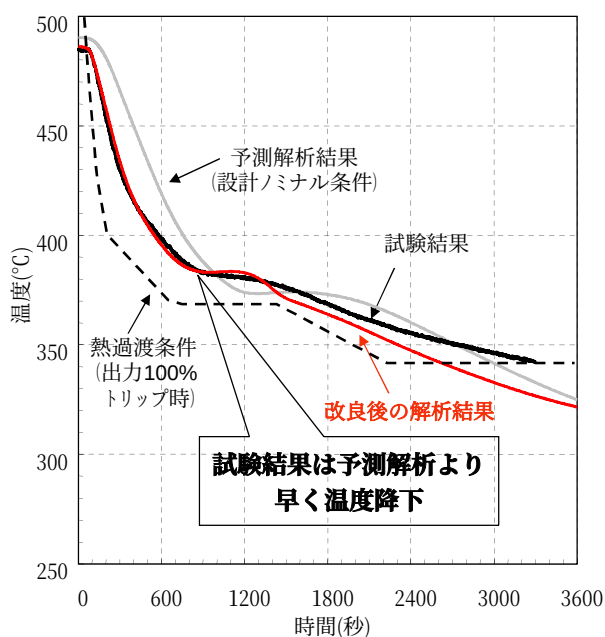
・試験前状態:電気出力40%状態

・試験内容 :タービントリップによる総合過渡試験



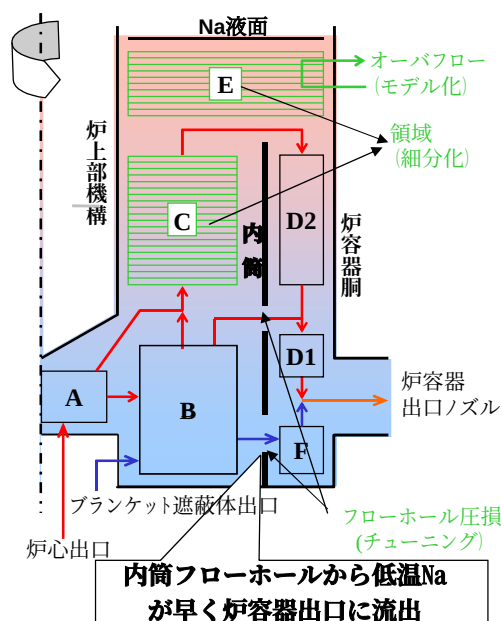
3

原子炉容器出口Na温度変化 - Super-COPD開発・整備 -



出力40%トリップ試験解析

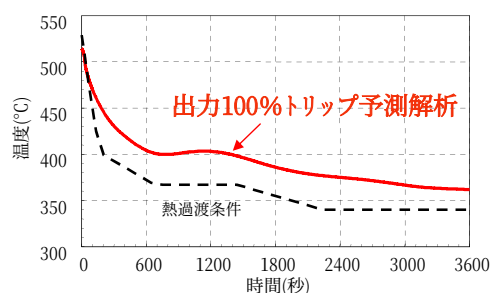
上部プレナム解析モデル改良



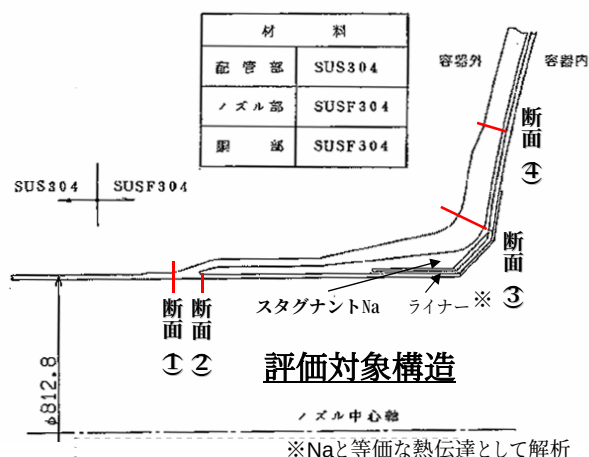
参考:宮川他、日本原子力学会「2000年春の年会」E32

4

実プラント熱過渡余裕 —原子炉容器出口ノズル部—

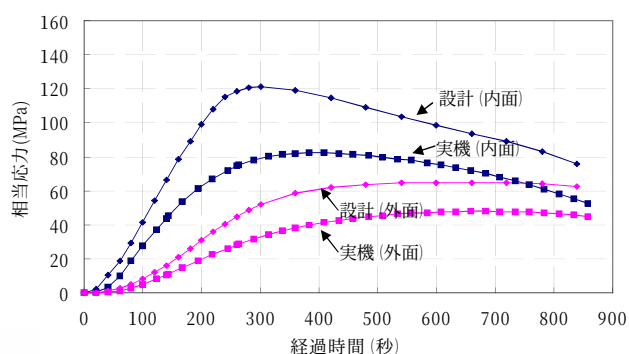


原子炉容器出口ノズル部熱過渡条件



評価対象構造

※Naと等価な熱伝達として解析



評価断面(3)の応力比較 (von Mises相当応力値)

実機応力最大値／設計応力最大値

	断面1	断面2	断面3	断面4
内面	61	60	68	67
外面	60	61	74	68

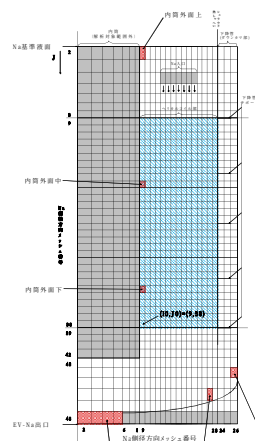
単位:%

設計時に対して25～40%の応力余裕

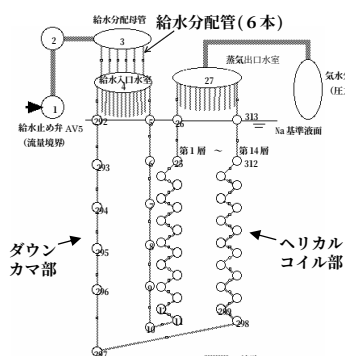
参考: 山田他, 日本原子力学会「2003年秋の大会」E62

5

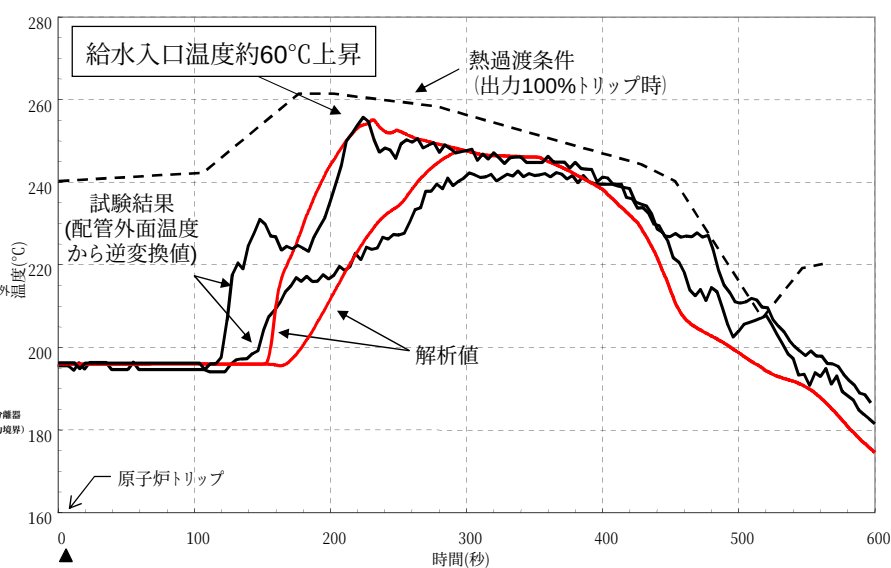
蒸発器給水入口温度変化 —MSG開発・整備—



Na側2次元R-Z体系メッシュ図



水蒸気側14チャンネルモデル図

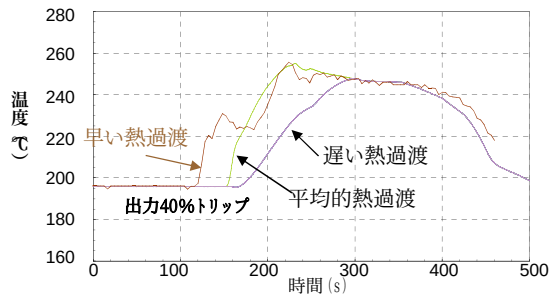


- ・解析結果は試験結果 (配管外面温度から標定) をほぼ模擬
- ・100秒以降、ヘリカルコイル下部～給水入口部の水蒸気は減圧沸騰により管内を正／逆流し、高温蒸気が給水入口部に流入

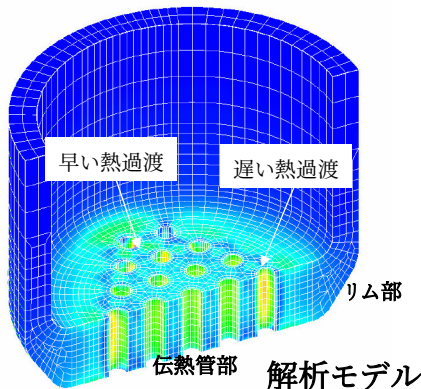
参考: 戸田他, 日本原子力学会「2003年秋の大会」F4
山田他, 日本原子力学会「2003年秋の大会」F5

6

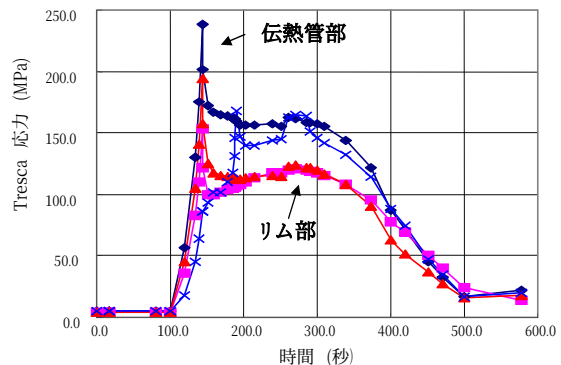
実プラント熱過渡余裕 — 蒸発器給水管板部 —



蒸発器給水入口部熱過渡条件



解析モデル



熱応力履歴

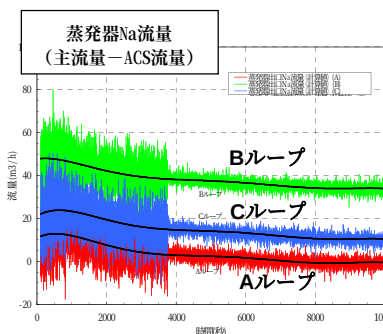
疲労損傷評価(手動トリップ約250回)

	最大応力 (MPa)	疲れ累積係数	備考
伝熱管部	238.7	0.00164	・告示制限値1.0 ・出口蒸気管板・
リム部	102.3	0.00000	疲れ累積係数 0.00246 (リム部)

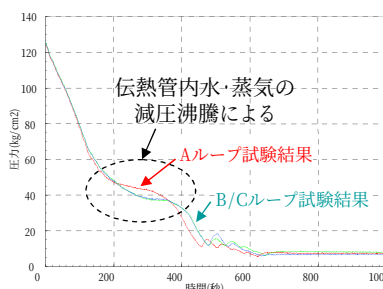
疲れ累積係数制限値を十分満足

7

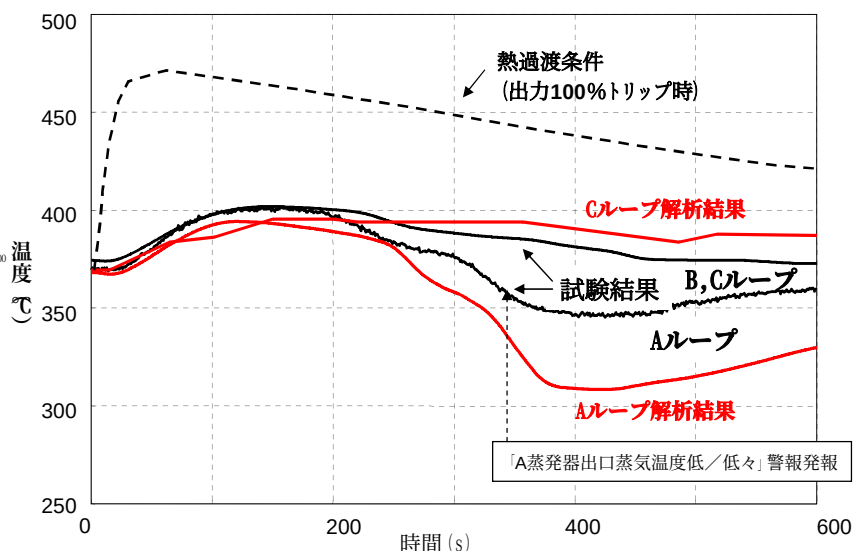
蒸発器出口蒸気温度変化 — MSG開発・整備 —



蒸発器Na流量試験結果



蒸発器出口蒸気圧力試験結果



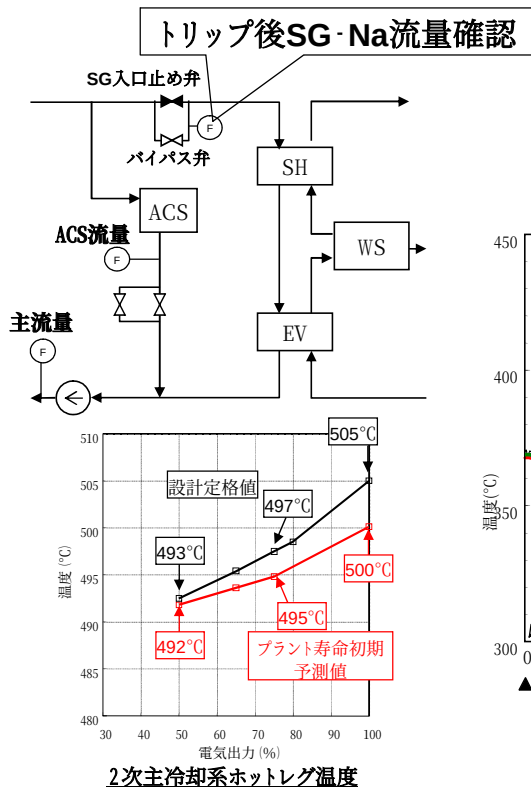
「A蒸発器出口蒸気温度低／低々」警報発報

- ・ 解析結果は、試験結果より温度変化は大きいが増減の傾向を再現
- ・ 出口蒸気圧力変化・Na流量のループ間の差異が影響

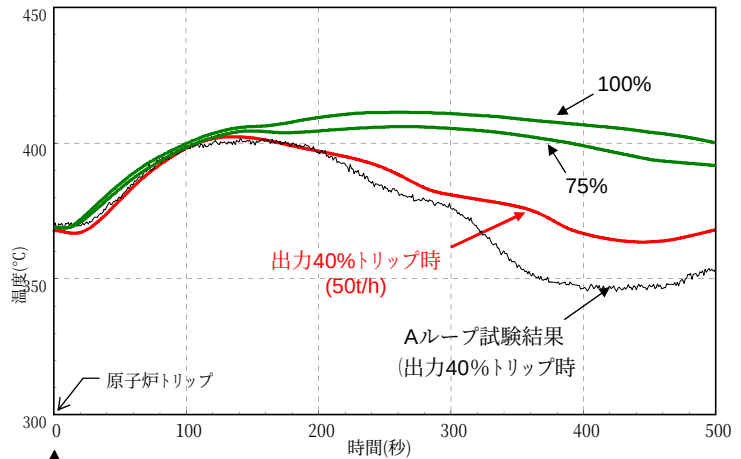
参考：山田他、日本原子力学会「2003年秋の大会」F5

8

熱過渡緩和方策



緩和方策→SG-Na流量を50t/h
(設計値35t/h±5t/h)に増加



蒸発器出口蒸気温度

9

まとめ

1. 熱流動解析コード開発・整備

→Super-COPD ⇒トリップ時解析整備完 ⇒今後全系解析
→MSG ⇒トリップ時解析整備完

2. 原子炉容器出口Na温度降下

→原子炉容器出口ノズル部 ⇒ 約25～40%の熱応力余裕

3. 蒸発器給水入口温度上昇

→蒸発器給水入口管板部⇒疲れ累積係数制限値を十分満足

4. A蒸発器出口蒸気温度低下

→出力40%時
⇒トリップ後SG・Na流量確認
→出力75%、100%時
⇒温度低下なしと予測



10



蒸気発生器伝熱管ECTセンサの開発

— 双方向励磁型リモートフィールドセンサの特性 (H13試作) —

核燃料サイクル開発機構 敦賀本部

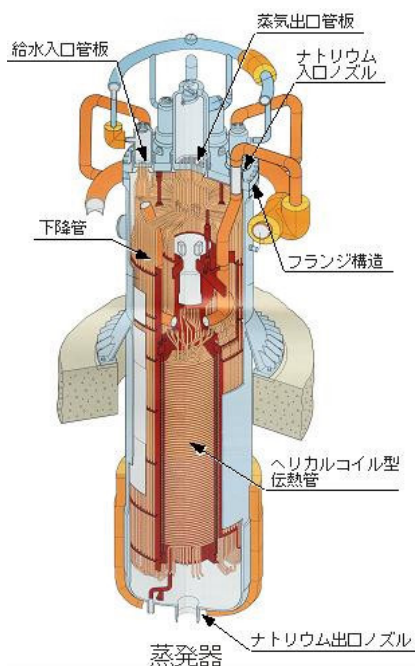
国際技術センター

ISIシステム開発グループ

椎名 章

1

蒸気発生器伝熱管仕様

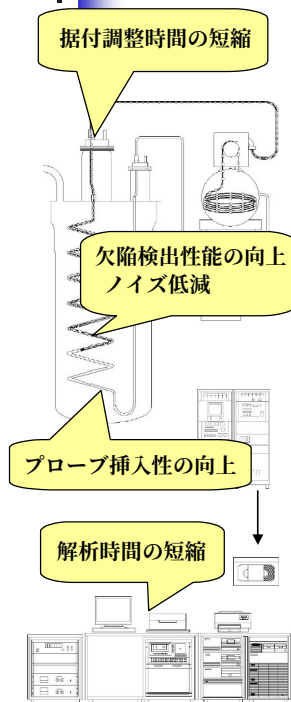


伝熱管仕様

項目	蒸発器	過熱器
伝熱管外径 (mm)	31.8	31.8
伝熱管肉厚 (mm)	3.8	3.5
ヘリカルコイル最大直径 (mm)	2500	2700
ヘリカルコイル最小直径 (mm)	1200	1400
伝熱管最小曲げ半径 (mm)	160	160
伝熱管長さ(m)	85	46
伝熱管材質	STBA24	SUS321
伝熱管本数 (本)	140	147

2

蒸発器伝熱管 ECTシステムの開発項目と目標

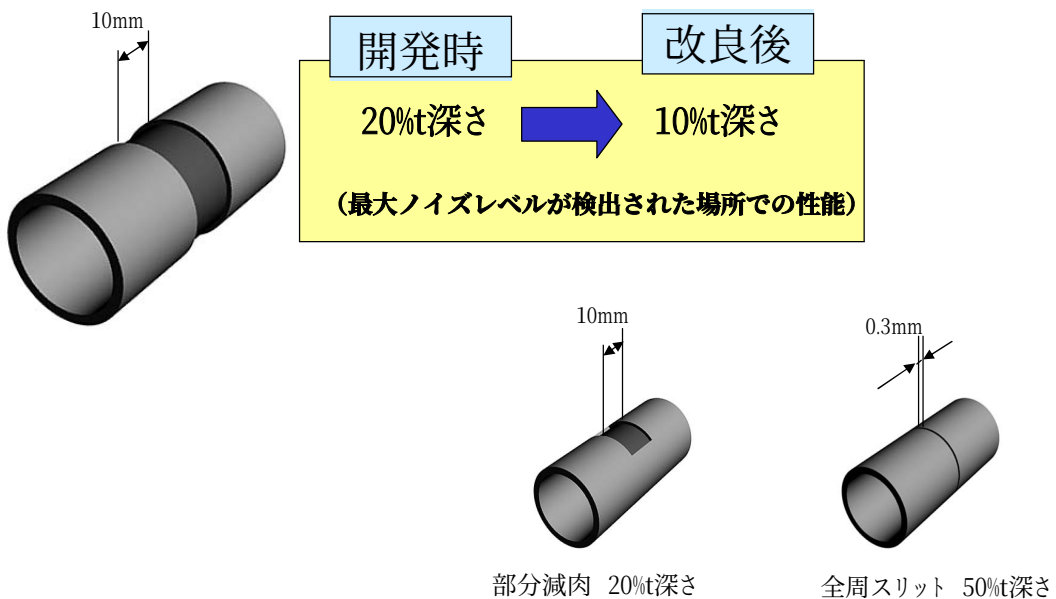


開発項目	実施項目	開発目標
1. 欠陥検出性能向上	・センサコイル設計の検討 ・ノイズの低減	・欠陥検出性能 約2倍
2. プローブ挿入性向上	・プローブ構造の改良 ・挿入条件の最適化	・スムーズな挿入引戻 ・搬送ノイズの半減
3. 検査時間短縮	・信号処理技術の開発 ・検査システムの改良	・装置調整時間半減 ・検査データのオンライン処理

3

蒸発器伝熱管 ECTシステムの欠陥検出目標

〔 全周減肉の検出性能 2倍 〕



4

蒸発器伝熱管 ECTセンサ開発

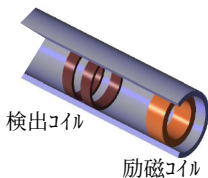
高感度・低ノイズリモートフィールドセンサの開発

高感度・低ノイズリモートフィールドセンサの開発

検出性阻害因子	構造からの制約
・ベンド信号 ・溶接信号 ・サポート信号 ・材料信号 ・センサ振動信号	・寸法制限 (内径約24mm) ・微小出力信号

従来型EV外面センサ

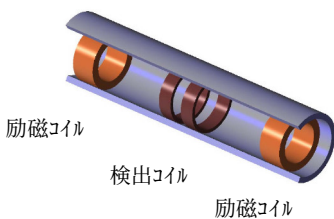
リモート・フィールド・センサ



改良型EV外面センサ

双方向励磁型

リモート・フィールド・センサ



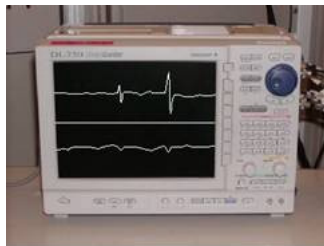
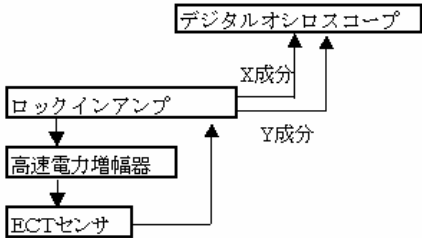
5

蒸発器伝熱管 ECTシステム探傷部



デジタルロックインアンプ

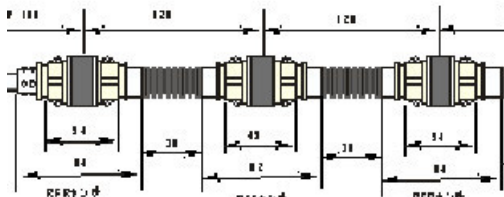
リモートフィールド探傷部
(蒸発器伝熱管の内外面探傷)



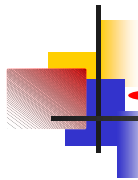
デジタルオシロスコープ



高速電力増幅器



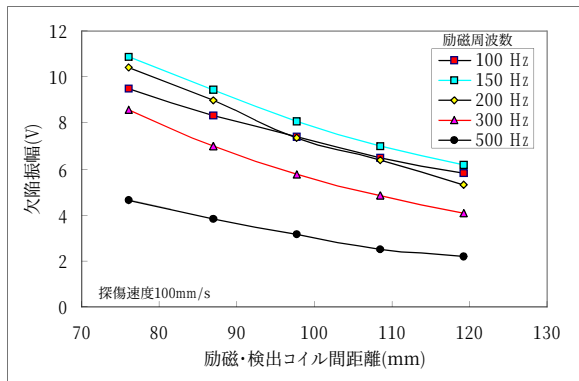
双方向励磁型リモートフィールドセンサ



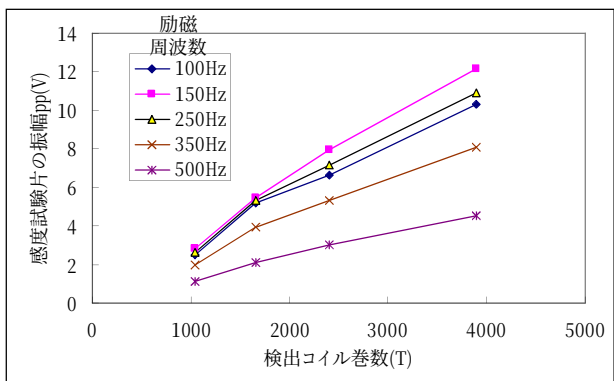
双方向励磁型リモートフィールドセンサの特性

センサ構造に起因する特性

- ・励磁・検出コイル間距離は短いほど感度が高い
- ・コイル巻数：巻数が多いほど感度が高い

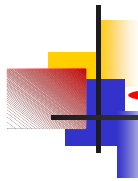


励磁・検出コイル間距離の影響



検出コイル巻数の影響

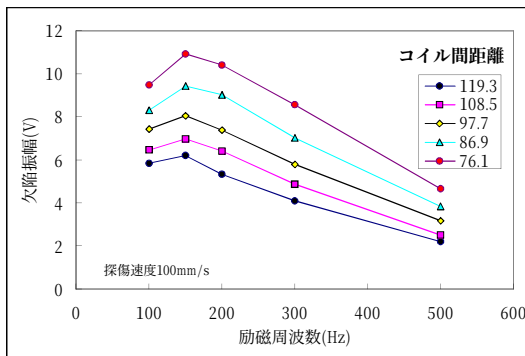
7



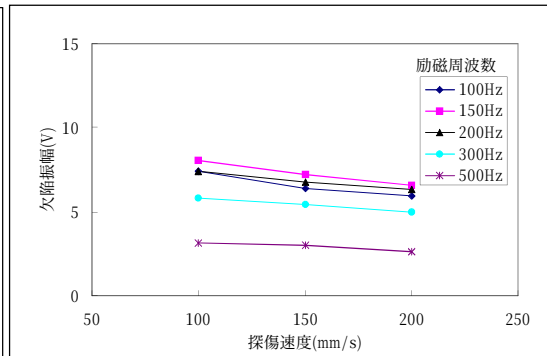
双方向励磁型リモートフィールドセンサの特性

探傷条件に起因する特性

- ・約150Hzの励磁周波数で感度が高い
- ・低速の探傷速度で感度が高い

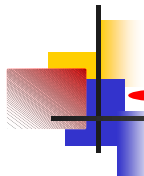


励磁周波数特性



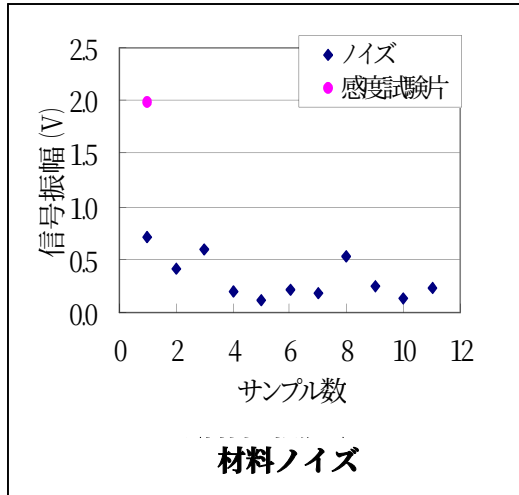
探傷速度特性 (コイル間距離119mm)

8



双方向励磁型リモートフィールドセンサの特性

基準試験片での欠陥検出性



欠陥検出性能

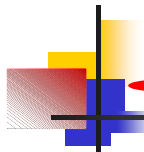
欠陥種類	欠陥幅 (mm)	欠陥長さ (mm)	欠陥深さ (%)
外面全周減肉	5	—	5
外面全周減肉	10	—	5
外面全周スリット	0.3	—	20
外面全周スリット	0.5	—	20
外面軸ノッチ	0.3	10	50
外面周ノッチ	0.3	10	50
外面ピンホール	φ5	—	50
外面局部減肉	10	—	50

本試験で用いた試験片

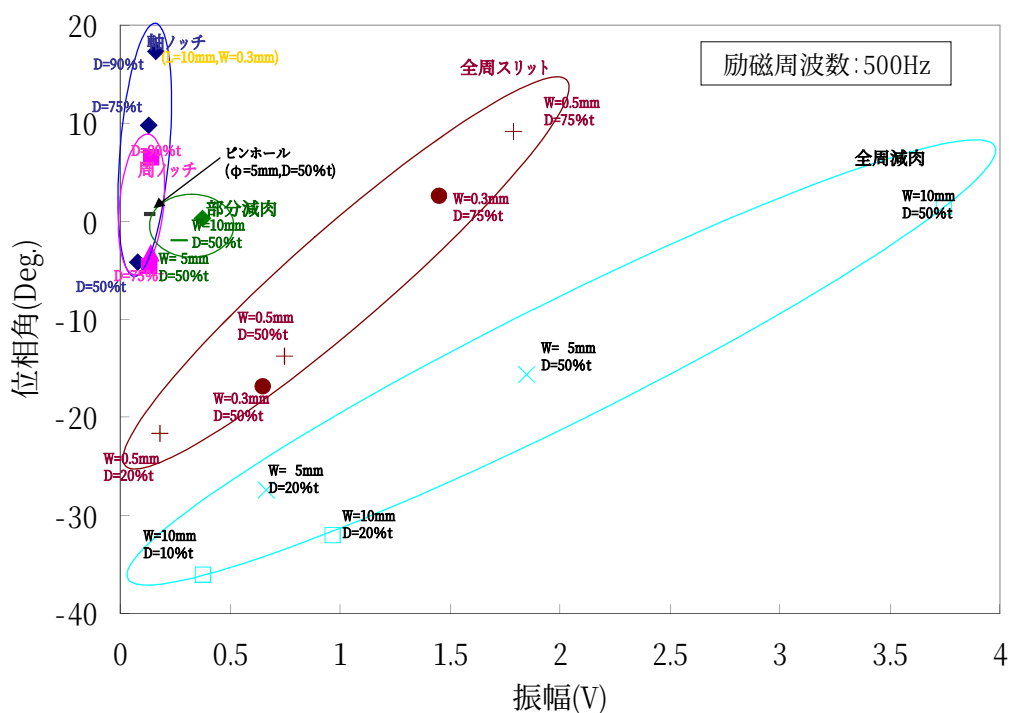
励磁周波数: 150Hz

探傷速度: 100mm/s

9



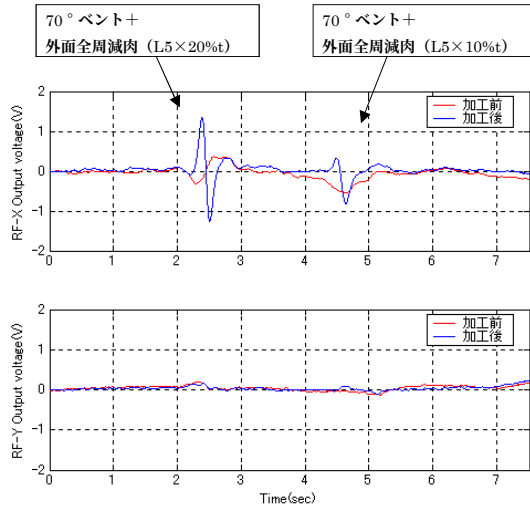
双方向励磁型リモートフィールドセンサの特性



10

双方向励磁型リモートフィールドセンサの特性

ベンド部での欠陥識別性



ベンド信号と欠陥信号の複合信号の例

欠陥信号の波形形状での識別性

欠陥種類	欠陥大きさ
外面全周減肉	W5×10%t
外面全周減肉	W10×10%t
外面全周スリット	W0.3×30%t

本試験で用いた試験片

探傷条件

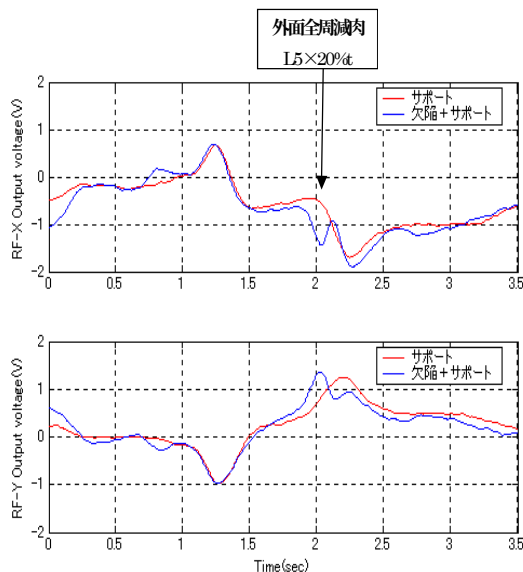
励磁周波数：150Hz

探傷速度：100mm/s

11

双方向励磁型リモートフィールドセンサの特性

サポート部での欠陥識別性



サポート信号と減肉の複合信号の例

欠陥信号の波形形状での識別性

欠陥種類	欠陥大きさ
外面全周減肉	W5×20%t
外面全周スリット	W0.5×20%t

本試験で用いた試験片

探傷条件

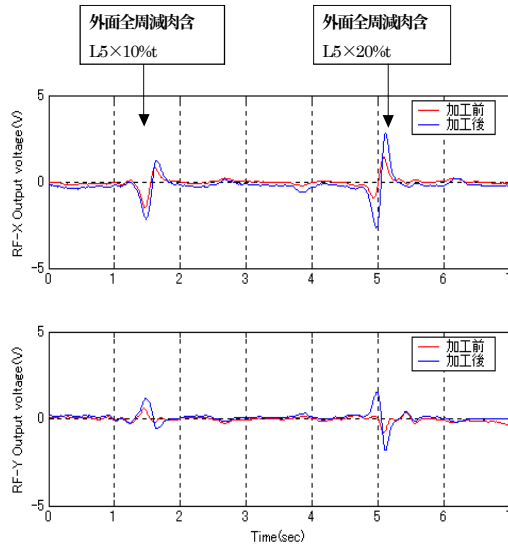
励磁周波数：150Hz

探傷速度：100mm/s

12

双方向励磁型リモートフィールドセンサの特性

溶接部での欠陥識別性



欠陥信号の波形形状での識別性

欠陥種類	欠陥の大きさ
外面全周減肉	W5×20%t
外面全周減肉	W10×10%t
外面全周スリット	W0.3×75%t

本試験で用いた試験片

探傷条件

励磁周波数：150Hz

探傷速度：100mm/s

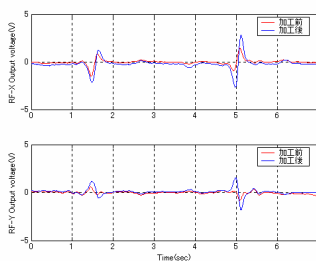
溶接信号と減肉の複合信号の例

13

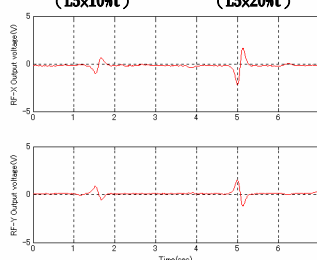
双方向励磁型リモートフィールドセンサの特性

差分法による溶接部欠陥の識別

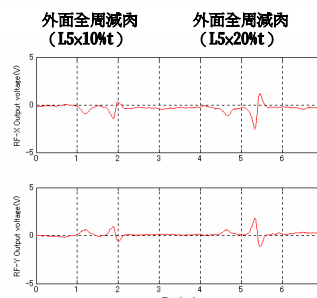
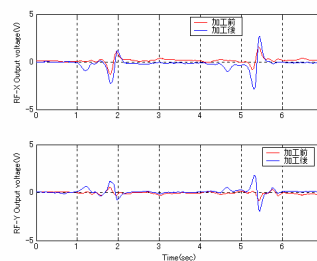
双方向励磁RFセンサでの例



演算結果



双方向励磁と片側励磁RFセンサでの例



溶接部欠陥の差分法での識別結果

欠陥種類	欠陥幅×長さ	欠陥深さ(%)
外面全周減肉	5×—	10
外面全周減肉	10×—	10
外面全周スリット	0.3×—	20
外面全周スリット	0.5×—	30
外面軸ノッチ	0.3×10	50
外面周ノッチ	0.3×10	50
外面周ノッチ	0.5×10	75
外面ピンホール	φ3×—	50

本試験で用いた試験片

14

もんじゅ蒸発器伝熱管モデルの改善

ヘリカルコイル部への基準試験片の取付方法の改善



基準試験片の設置状況



溶接フランジ型基準試験片

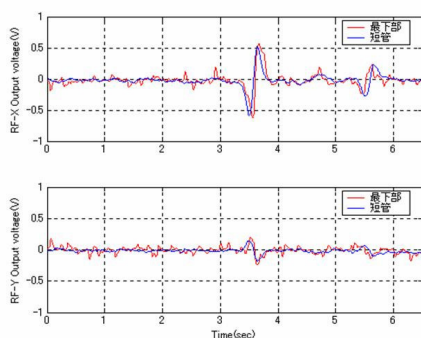


取外フランジ型基準試験片

15

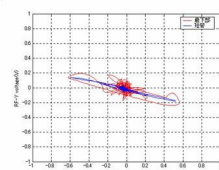
双方向励磁型リモートフィールドセンサの特性

実機模擬伝熱管での欠陥検出性



外面全周減肉 L10×10%t

外面全周減肉 L10×5%t



ヘリカル管下部と基準試験片との信号比較例

欠陥の波形形状での識別性

欠陥種類	欠陥の大きさ
外面全周減肉	W10×10%t以下
外面軸ノッチ	W0.5×L10×50 ～90%t
外面周ノッチ	W0.5×L10×50 ～90%t

本試験で用いた試験片

探傷条件

励磁周波数：150Hz

探傷速度：100mm/s

16

まとめ

双方向励磁型リモートフィールドセンサの推奨値および探傷条件

- ・コイル間距離： 75mm (挿入性を考慮し今後最適化)
- ・コイル巻数： 1500巻 (S/N、センサ構造から今後最適化)
- ・励磁周波数： 150～500Hz (150Hzを中心に多重周波探傷を検討)
- ・探傷速度： 100～200mm/s (感度とS/Nを考慮し今後最適化)



H13試作双方向励磁型リモートフィールドセンサの評価

- ・目標とする全周減肉の検出性能向上の見通しを得た
(搬送ノイズが約1/2、ベント部の欠陥識別性が約2倍)
- ・局部減肉やスリット状欠陥に対する検出性を確認した

17

蒸発器伝熱管用ECTセンサ開発の進め方

- 1、実機模擬伝熱管での欠陥検出性検証
 - ・センサ搬送時の欠陥識別性向上
 - ・センサ搬送を踏まえたセンサ構造の最適化
- 2、インテリジェントセンサの欠陥検出性検証
- 3、信号処理による識別性向上

18

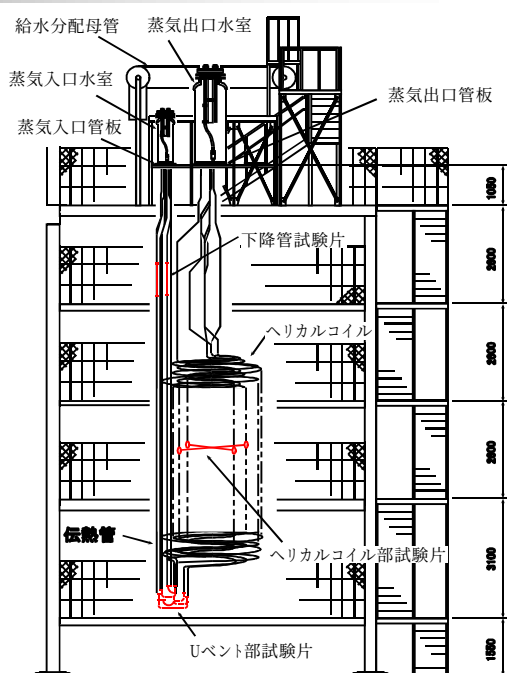
「もんじゅ」用「S」装置開発施設



A1

蒸気発生器伝熱管検査システム開発設備

もんじゅ蒸気発生器モデル



蒸気器モデル構造

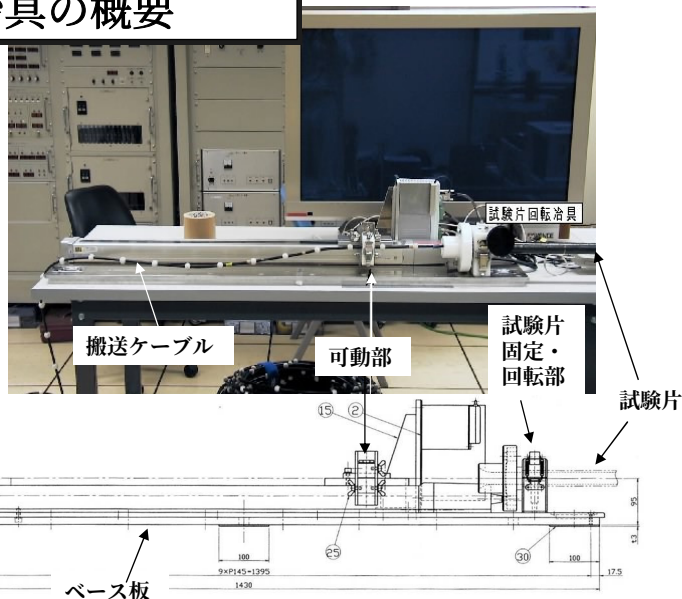
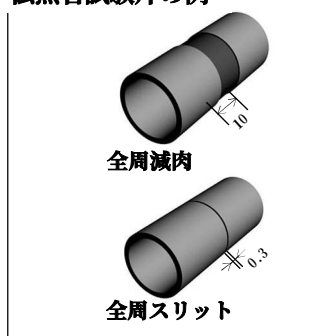
A2

蒸気発生器伝熱管 ECTセンサ試験

センサ試験治具の概要

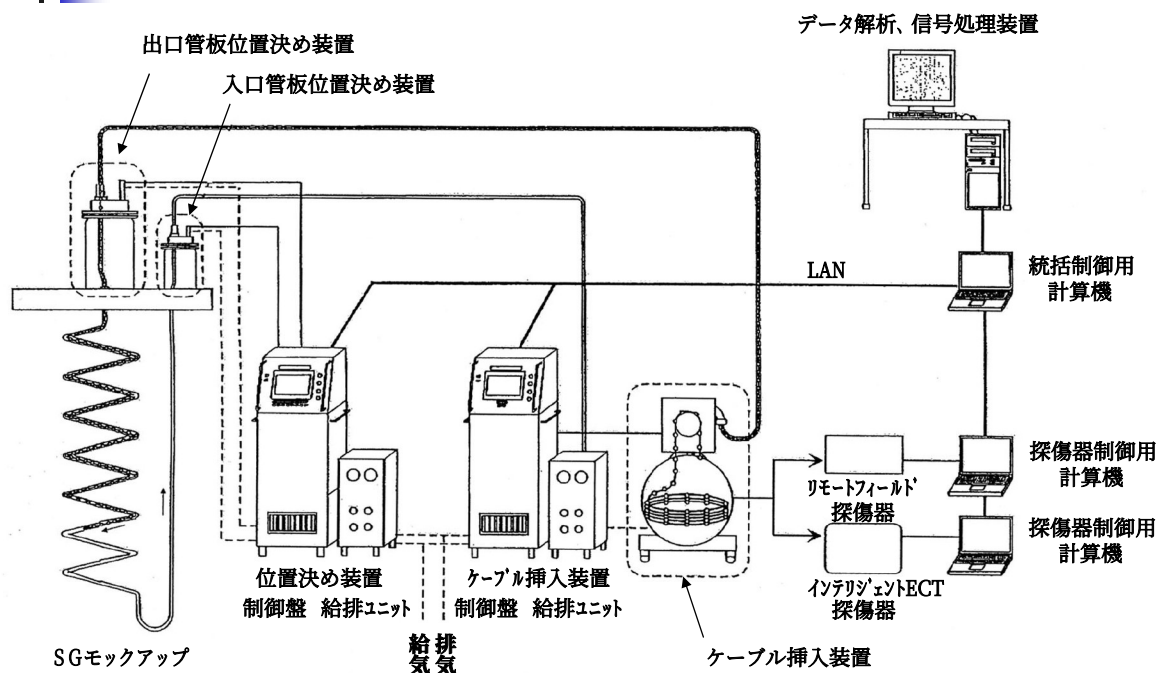
主な機能	
センサ移動距離	800mm
速度範囲	～800mm/sec
試験片回転角度	180度

伝熱管試験片の例



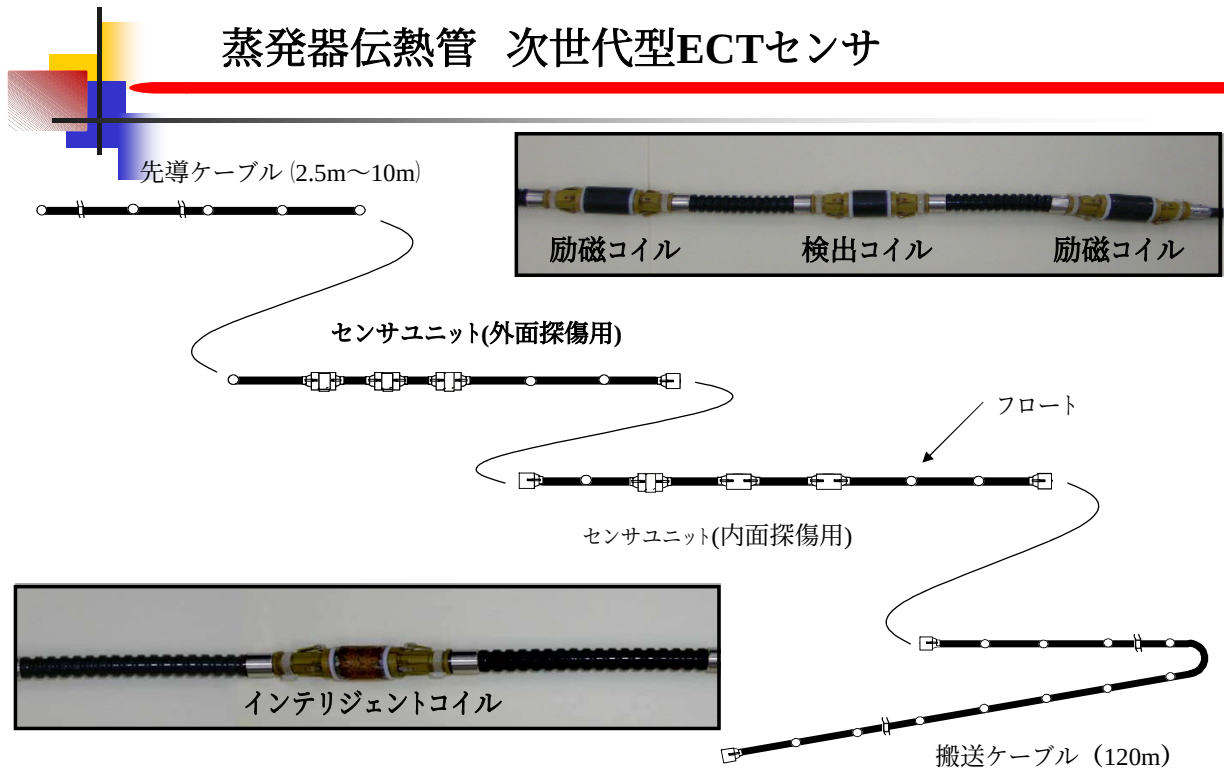
A3

蒸発器伝熱管 次世代型ECTシステム構成



A4

蒸発器伝熱管 次世代型ECTセンサ



探傷プローブ全体形状 (蒸発器伝熱管探傷用)

A5

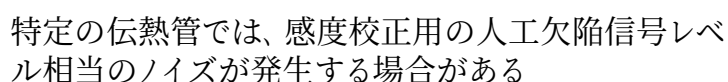
燃料サイクル開発機構 敦賀本部
国際技術センター
[S]システム開発グループ
今井 義之

据付調整時間の短縮

- ・欠陥検出性能の向上
- ・ノイズ低減

プローブ挿入性の向上

解析時間の短縮



H16年3月10日(水) / JNC

搬送ノイズ低減のためのプロセス

1. ノイズ発生要因の特定

- ・高速度カメラによるセンサ挙動の調査
- ・荷重計、加速度計による振動データの取得

2. ノイズ低減対策の検討と検証

- ・データ分析とノイズ低減対策の検討
- ・モックアップ装置によるノイズ低減対策の検証

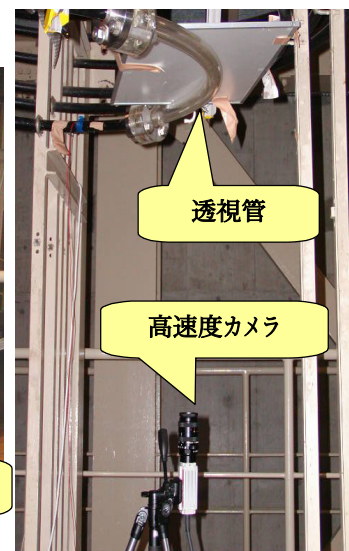
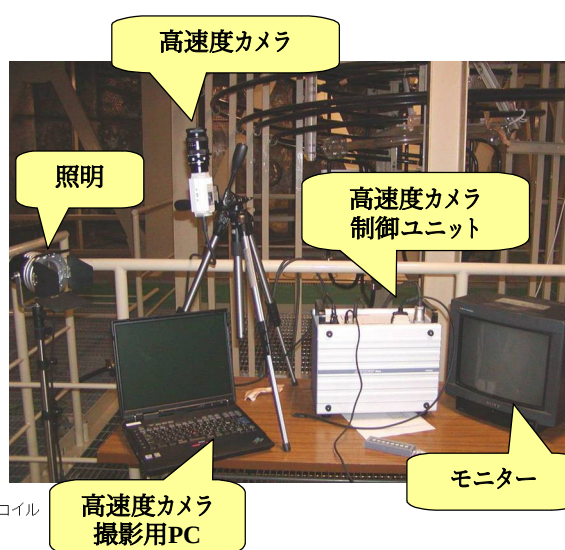
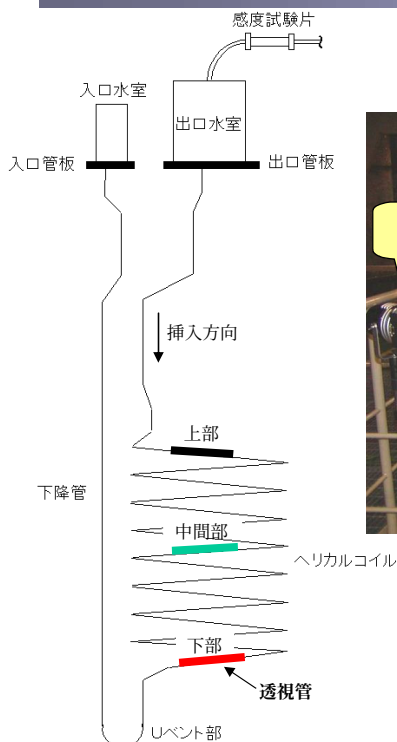
3. 実機適用プローブへの反映

- ・挿入性も考慮したプローブ設計

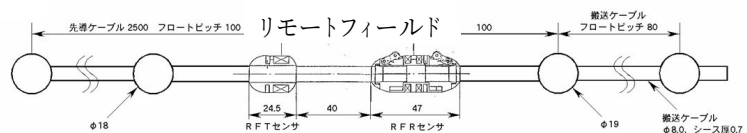
H16年3月10日(水) / JNC

3

高速度カメラによるセンサ挙動の調査



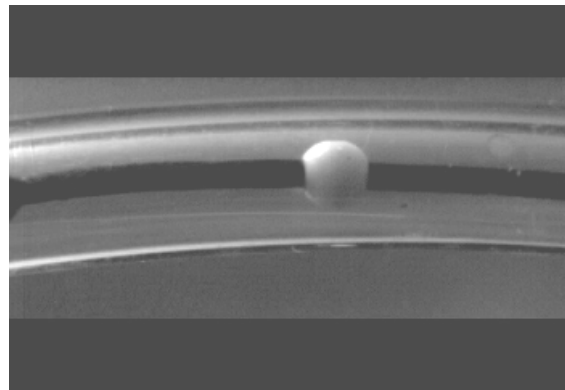
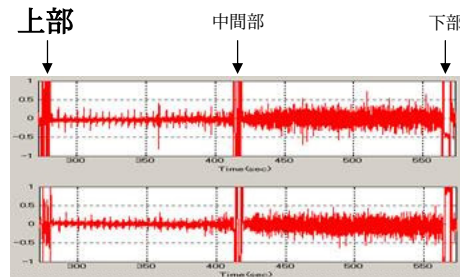
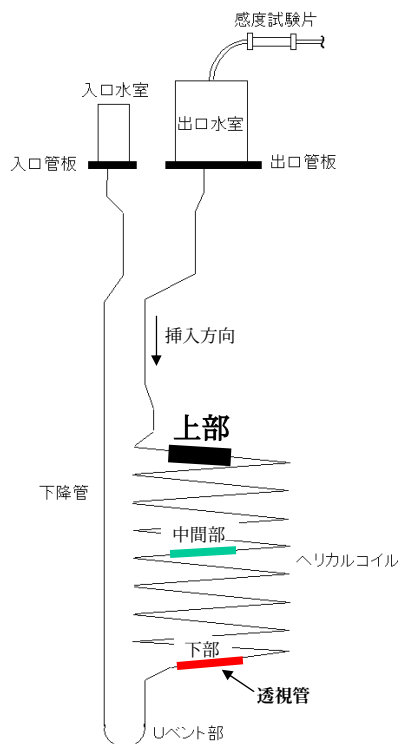
(外面探傷用)



H16年3月10日(水) / JNC

4

ヘリカル上部透視管 1



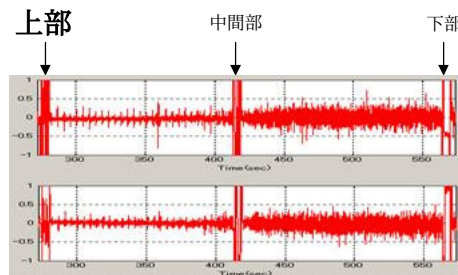
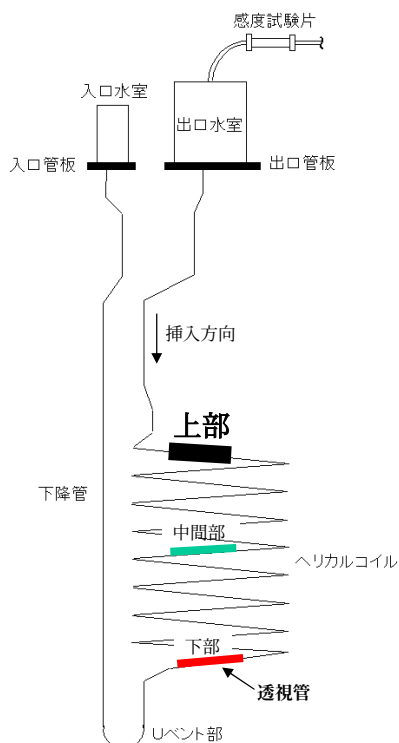
上部透視管で垂直方向撮影時の映像

ヘリカル
外側
↑
↓
ヘリカル
内側

H16年3月10日(水) / JNC

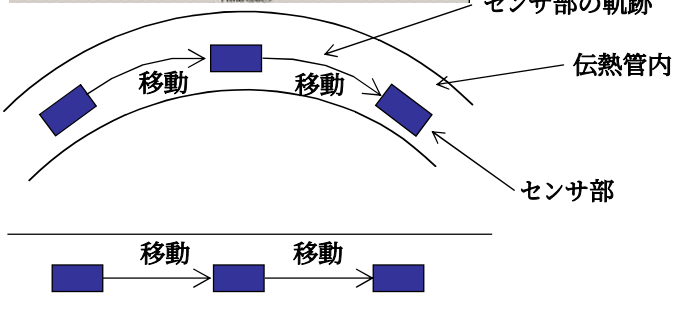
5

ヘリカル上部透視管 2



透視管を垂直
方向から観察

透視管を水平
方向から観察

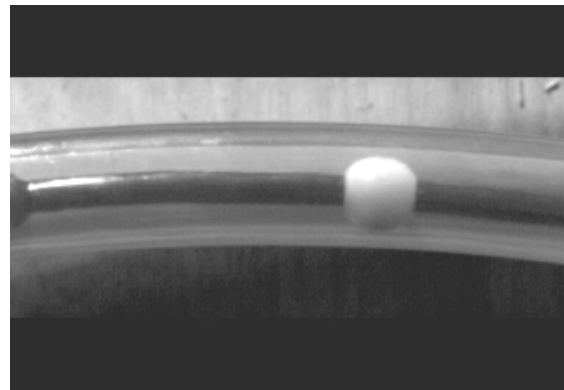
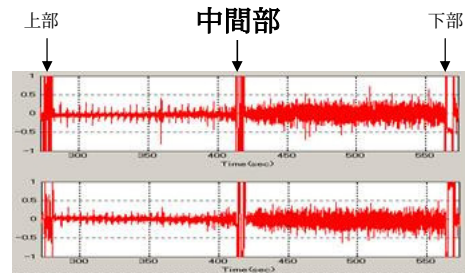
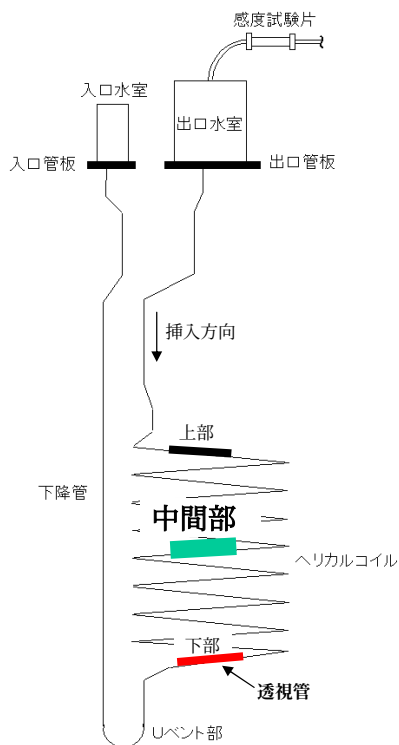


センサはスムーズに移動

H16年3月10日(水) / JNC

6

ヘリカル中間部透視管 1



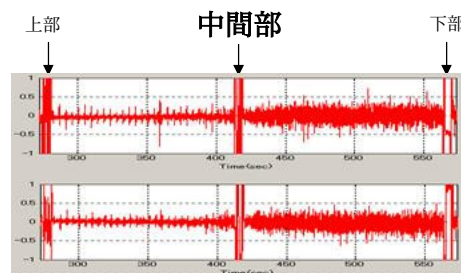
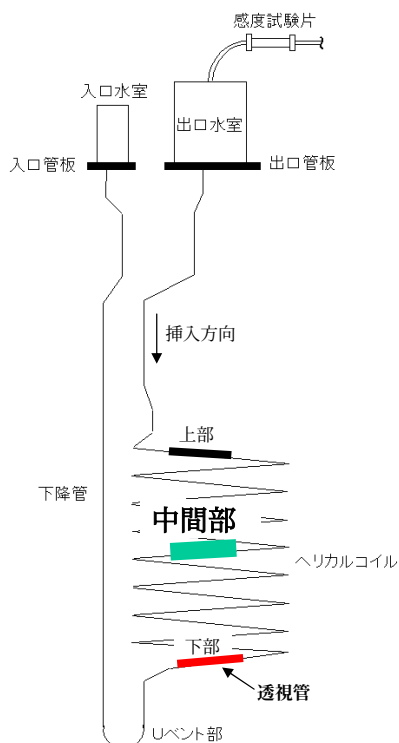
中間部透視管で垂直方向撮影時の映像

ヘリカル
外側
↑
↓
ヘリカル
内側

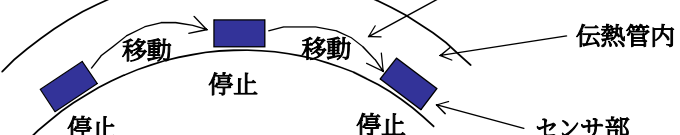
H16年3月10日(水) / JNC

7

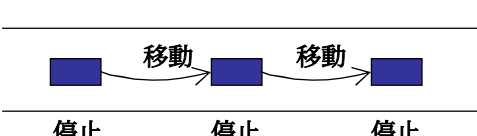
ヘリカル中間部透視管 2



透視管を垂直
方向から観察



透視管を水平
方向から観察

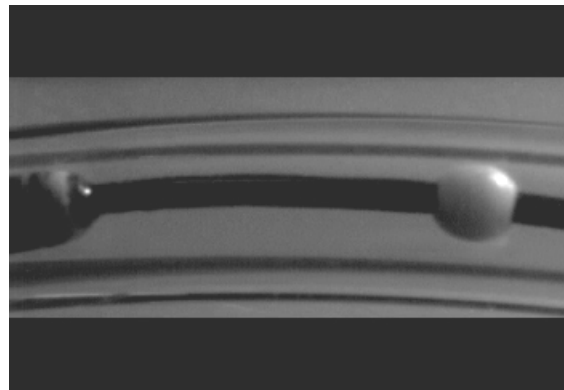
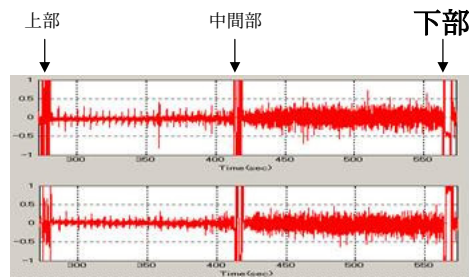
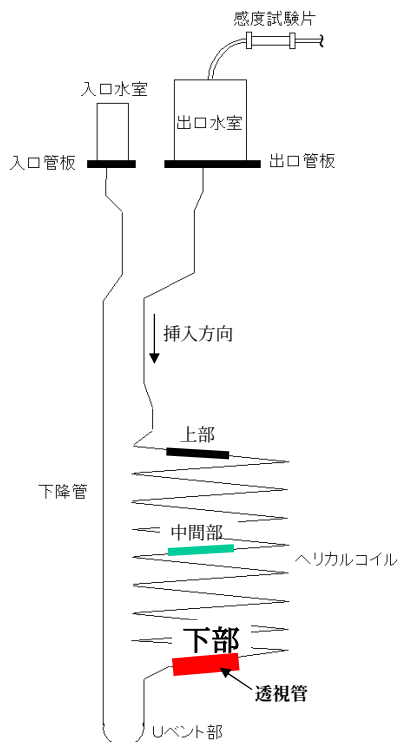


センサは停止と移動を周期的に繰り返し、移動の際に径方向に若干変位

H16年3月10日(水) / JNC

8

ヘリカル下部透視管 1

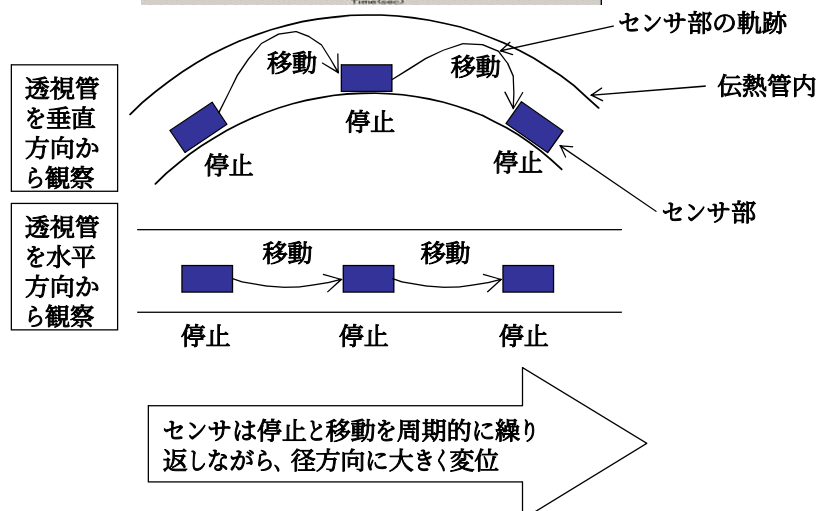
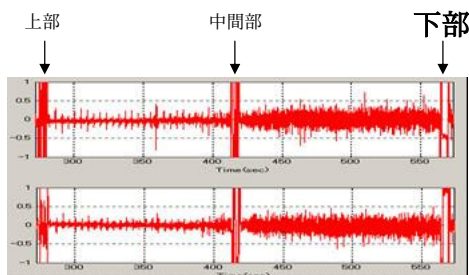
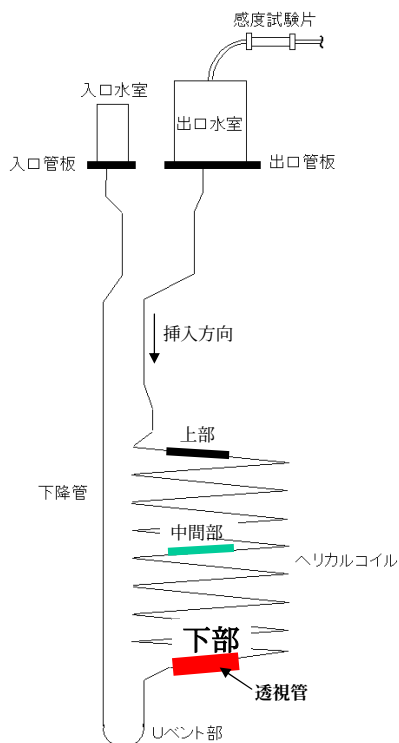


下部透視管で垂直方向撮影時の映像

H16年3月10日(水) / JNC

9

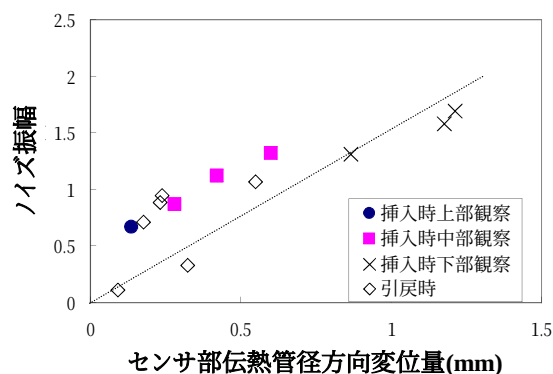
ヘリカル下部透視管 2



H16年3月10日(水) / JNC

10

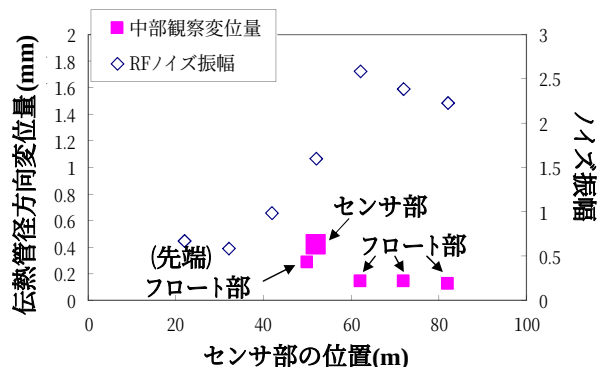
ノイズとセンサ部の変位量の関係



①センサ部の変位量とノイズの大きさには相関がある。



センサ部の動きを抑えることでノイズ低減



②先端近くでは変位量大きい



センサ部を先端から遠ざける

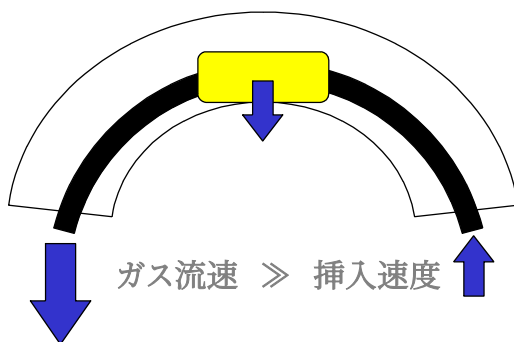
H16年3月10日(水) / JNC

11

センサ挙動に関する考察 1

①

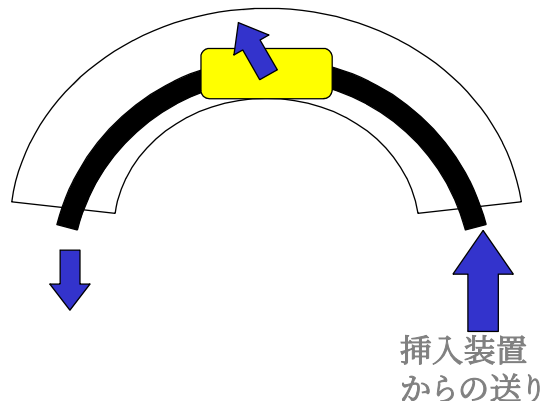
プローブを挿入していくと、ある地点からヘリカルコイル内側に巻きつく。巻きついて拘束力の大きくなった部分は、進みづらくなり、停止する。



②

後ろから押され、止まっていた部分も前進する。

この時、センサよりも前の部分が抵抗となり、センサはヘリカル外側へ向かって押し出される。



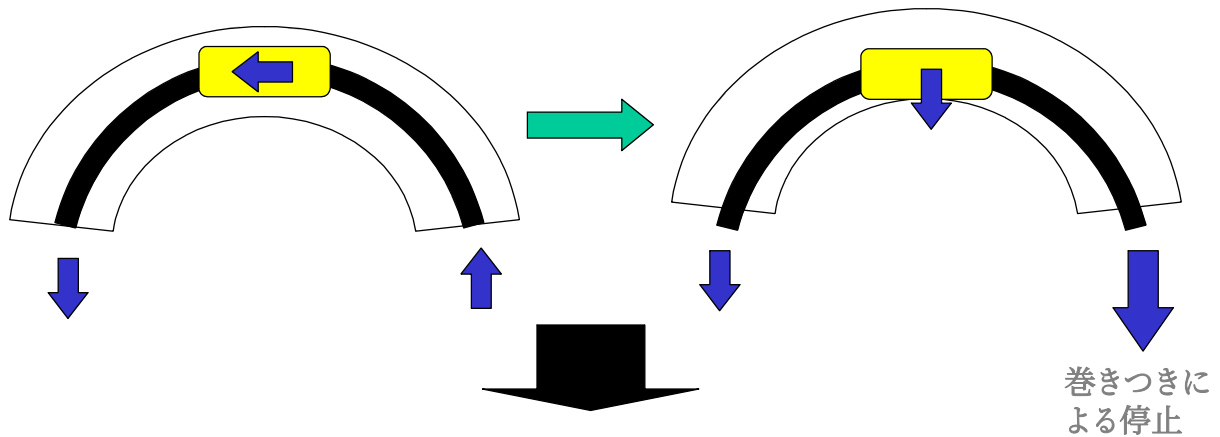
H16年3月10日(水) / JNC

12

センサ挙動に関する考察 2

③

ある程度進むと、ガス流速が早いために後方は結局引張られて、巻きついてしまい、拘束力によって停止し、センサはヘリカル内側にたたきつけられる。



- ・センサ部付近の軸方向の動きを吸収する
- ・プローブ全体の摩擦を調整する

H16年3月10日(水) / JNC

13

有効と考えられるノイズ低減手法

① センサ軸方向振動抑制

- ・ダンパーの導入
- ・プローブ巻き付き力の低減

② センサ部の変位量低減

- ・センサ位置の後退
→ 先導ケーブルの延長

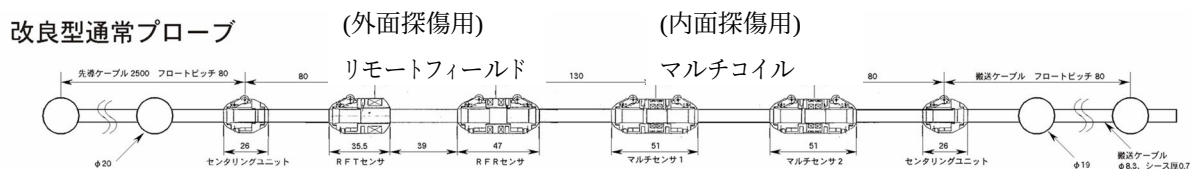
H16年3月10日(水) / JNC

14

先導ケーブル効果検証試験

項目	条件
先導ケーブルの長さ	・2.5m → 実機探傷時と同じ ・10m → 観察結果より選定
先導ケーブルの剛性	・中実ケーブル → 実機探傷時と同じ ・中空ウレタンチューブ
フロート径	・φ19 ・φ20

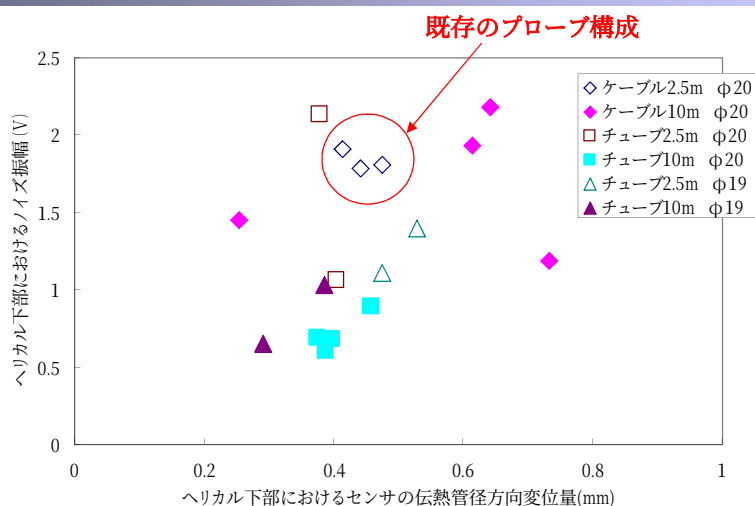
実機探傷時に使用したプローブ



H16年3月10日(水) / JNC

15

先導ケーブル効果 1



先導ケーブルを長くし、先導部の搬送力を大きくする

先導ケーブルを柔らかくする

センサを引っ張ることにより、径方向への浮き上がりを防止すると考えられる

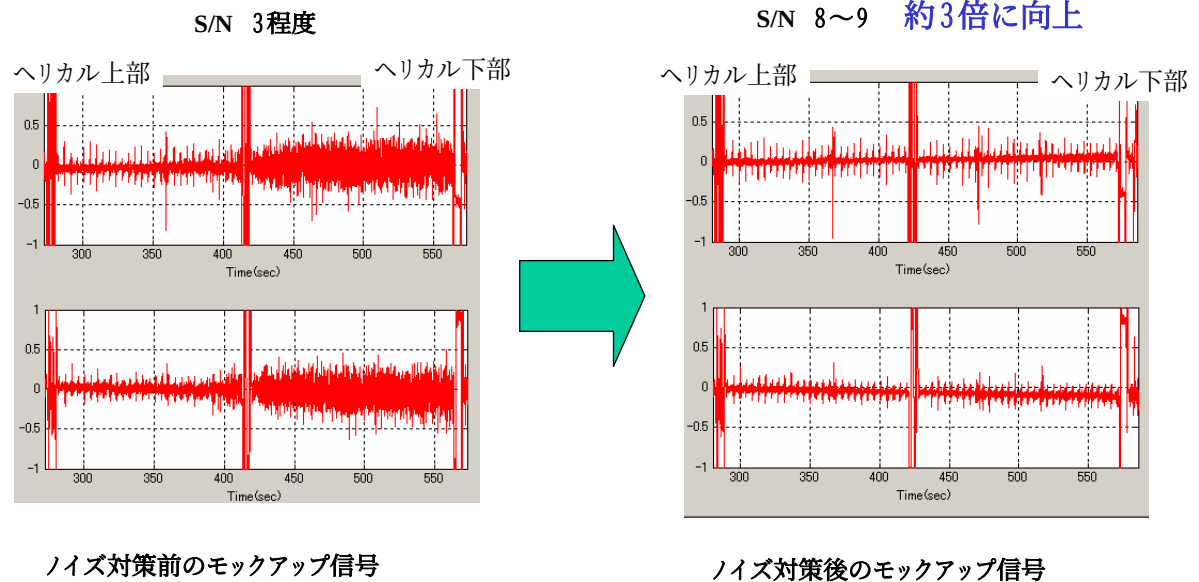
軸方向の振動の吸収効果やケーブル反力の低減による効果と考えられる

H16年3月10日(水) / JNC

16

まとめ

伝熱管半径方向の振動に起因する搬送ノイズは、先端ケーブルのチューニング及び調芯機構の取り外しにより低減できる見込みを得た。



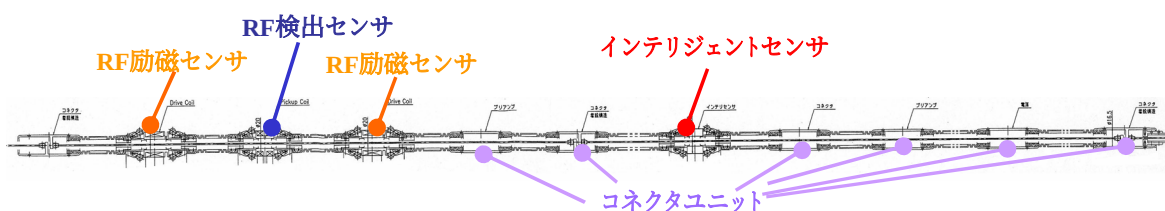
H16年3月10日(水) / JNC

19

今後の予定

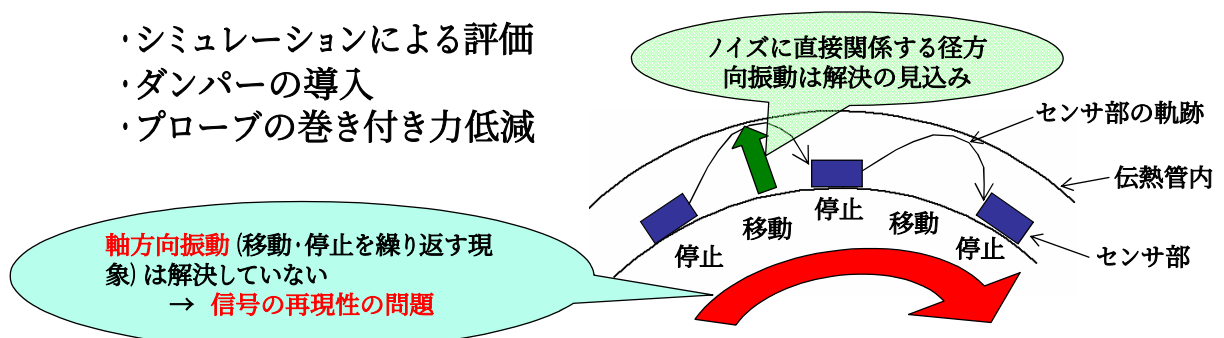
1. 実機探傷予定の新型プローブ構成での検証

・新型プローブ: リモートフィールド+インテリジェントセンサ



2. 軸方向振動の原因究明と対策 (九州大学との共同研究)

- ・シミュレーションによる評価
- ・ダンパーの導入
- ・プローブの巻き付き力低減



H16年3月10日(水) / JNC

20



高速実験炉「常陽」の概要

設置目的

- ・ 自主技術により、ナトリウム冷却高速炉を設計・建設・運転
得られた技術的経験を後続炉に反映
- ・ FBR用燃料、材料開発のための高速中性子場として活用

MK-I炉心（増殖炉心） 1977年 初臨界達成

原子炉熱出力：50MWt、75MWt

- ・ 増殖性能の実証
- ・ 運転保守経験の蓄積

MK-II炉心（照射用炉心） 1982年 初臨界達成 積算運転時間：60,725時間

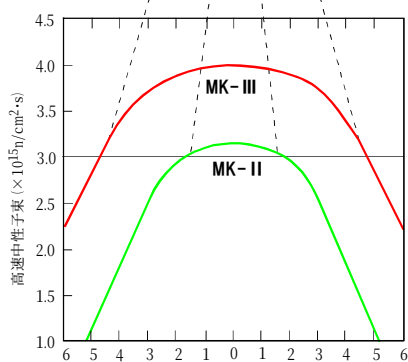
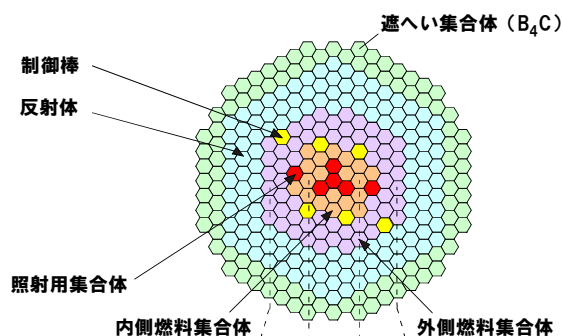
原子炉熱出力：100MWt

MK-II運転終了まで

- ・ FBR用燃料・材料の照射試験 (2000年6月)
- ・ 燃料溶融試験、燃料破損模擬試験等の特殊試験

高速中性子場としての性能をさらに向上するため、
2000年10月にMK-III冷却系改造工事を開始

MK-III計画の概要



高速中性子束分布

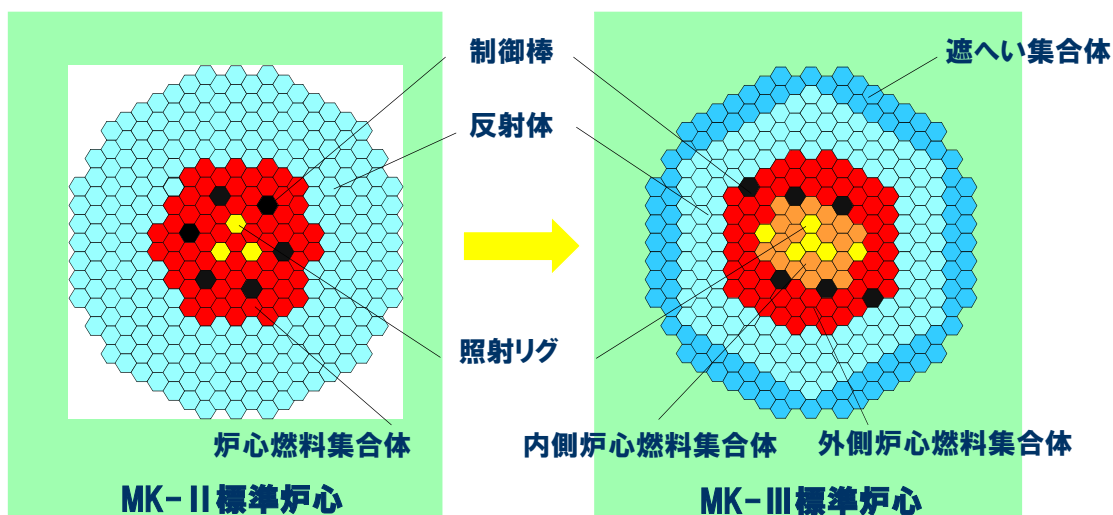
- 高速中性子束 約1.3倍
- 照射スペース 約2倍
- 稼働率 約1.5倍

全体で約4倍の能力アップ

以下の改造を実施

1. 炉心の変更：高中性子束化、照射場の拡大
2. 冷却系の改造：除熱能力の向上
3. 計測制御系の変更：熱過渡の緩和
4. 燃料取扱設備自動化：燃料交換時間の短縮

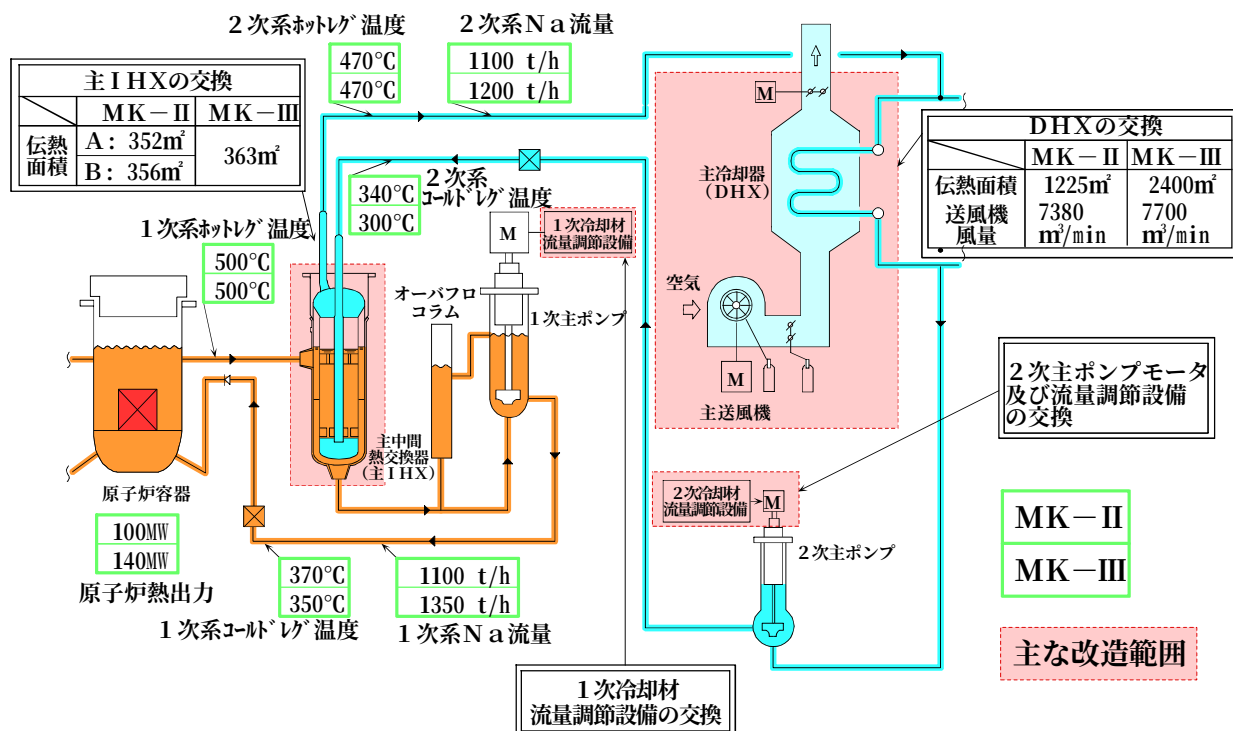
炉心の変更



主な変更点

- | | | |
|--|----------|-----------------|
| ・原子炉熱出力 | 100MWt | → 140MWt |
| ・燃料集合体の最大装荷数 | 67体(1領域) | → 85体(2領域) |
| ・制御棒の配置 | 第3列 6体 | → 第3列 4体、第5列 2体 |
| ・炉心高さ | 55cm | → 50cm |
| ・第9、10列の反射体(96体)を遮へい集合体(B ₄ C)に置換 | | |
| ・照射燃料集合体の最大装荷数 | 計 9体 | → 計 21体 |

冷却系の改造



計測制御系の変更

・原子炉スクラム時の冷却系機器動作の変更

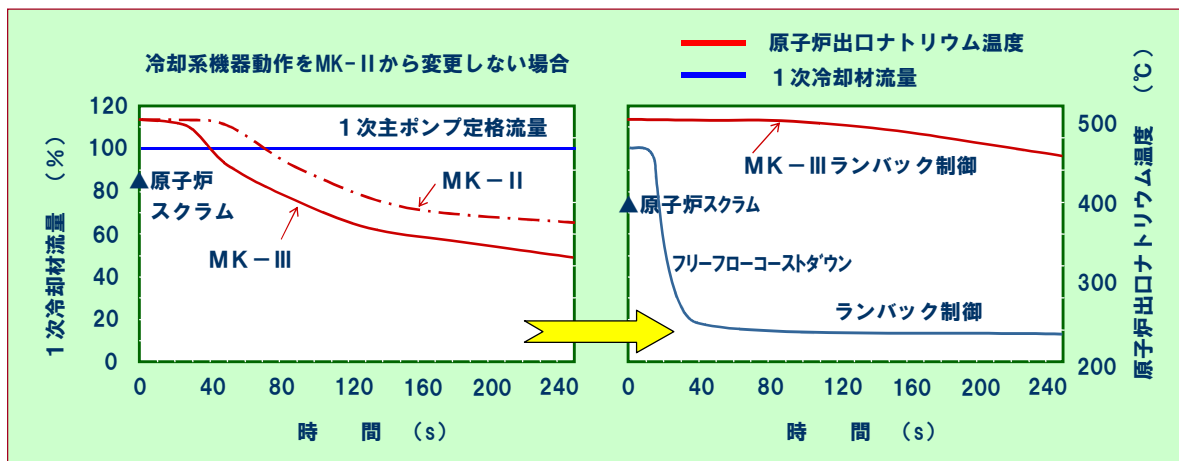
MK-II

- ・ 1次主冷却系 定格流量
- ・ 2次主冷却系 定格流量
- ・ 主送風機 手動停止



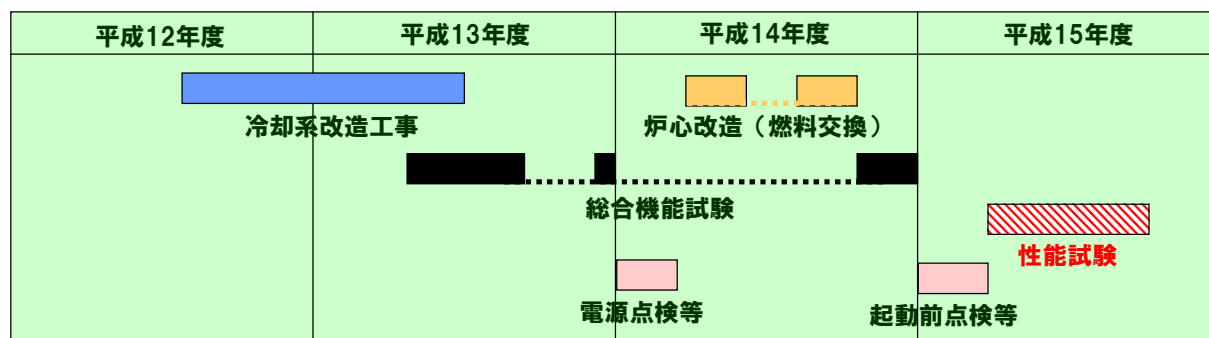
MK-III

- ・ 1次主冷却系 ランバック運転
- ・ 2次主冷却系 自然循環（主ポンプ停止）
- ・ 主送風機 急速停止





性能試験の目的



主要な変更点

1. 炉心の変更
2. 冷却系の改造
3. 計測制御系の変更



性能試験の目的

1. 設計性能の確認
(試験炉規則第3条の5に定める性能検査等)
2. 運転パラメータの取得
3. 照射炉としての基本特性の確認



性能試験項目

炉心特性試験

- ・ 臨界
- ・ 過剰反応度
- ・ 核出力校正
- ・ 制御棒校正
- ・ 等温温度係数
- ・ 出力係数
- ・ 燃焼係数
- ・ 燃料集合体出口温度分布
- ・ 炉雑音

プラント特性試験

- ・ 出力上昇
- ・ 定格出力連続運転
- ・ 熱出力校正
- ・ 定常伝熱特性
- ・ 制御棒微小引抜・挿入応答
- ・ 主冷却器出口温度変化応答
- ・ M系列
- ・ 手動スクラム
- ・ 外部電源喪失
- ・ 主冷却系による崩壊熱除去
- ・ 運転温度圧力確認
- ・ ナトリウム・カバーガスアルゴン分析

- ・ 廃ガス濃度
- ・ コールトラップ運転確認
- ・ 主送風機起動特性確認

遮へい特性試験

- ・ 空間線量率分布

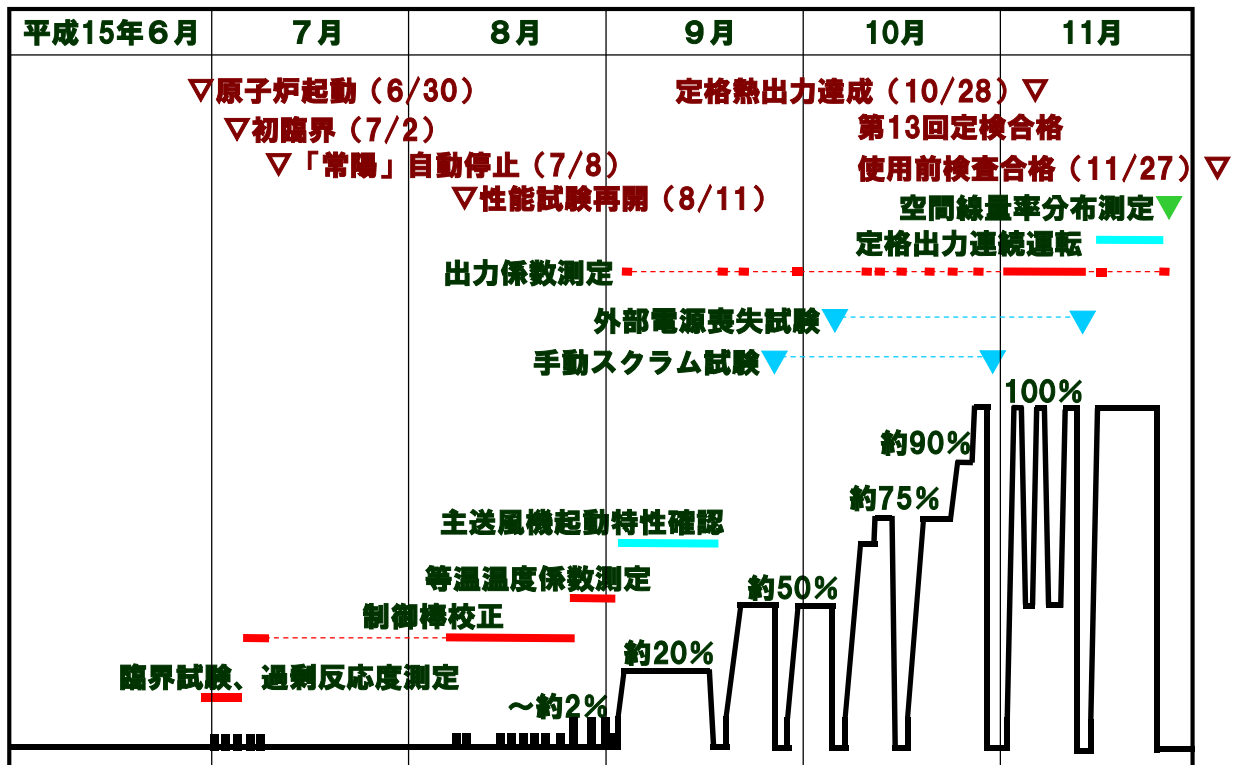
運転監視

- ・ 放射線管理
- ・ 燃料破損検出系特性
- ・ 機器振動監視

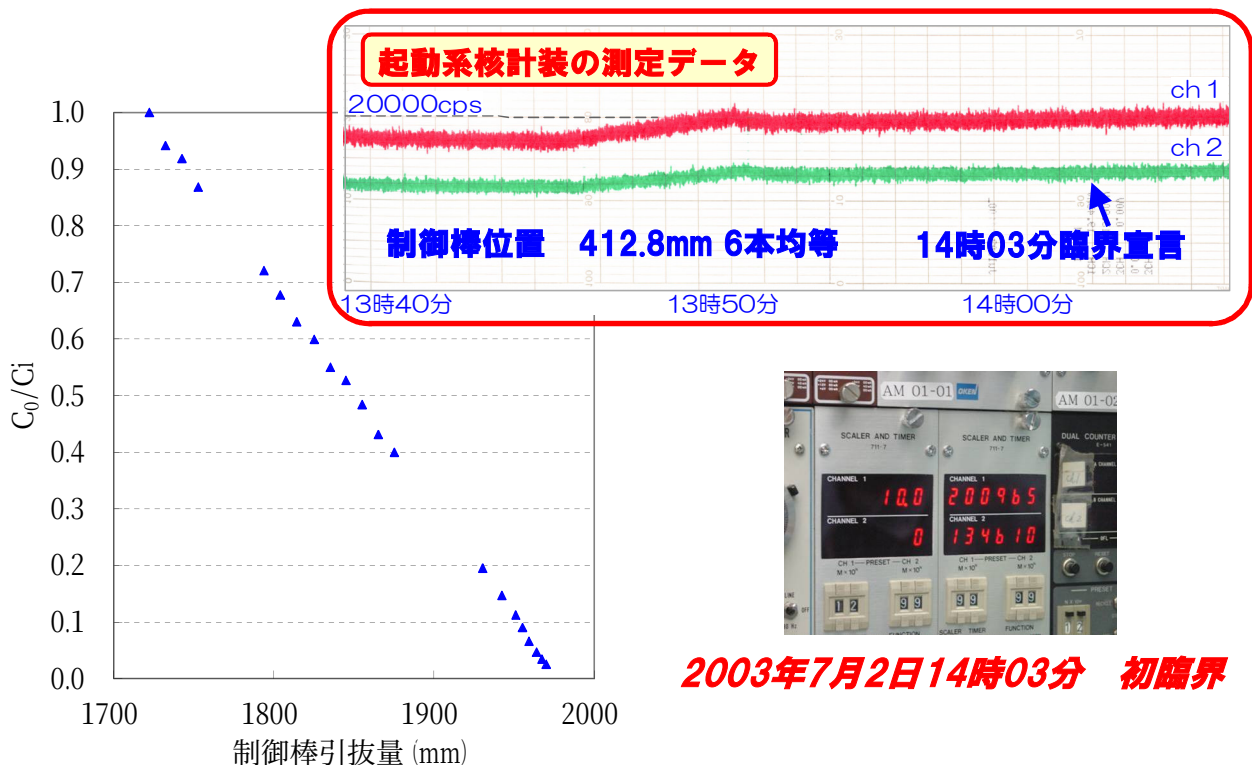
計28項目



性能試験概略工程

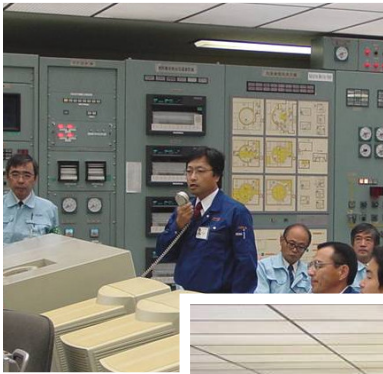


臨界試験（臨界近接）

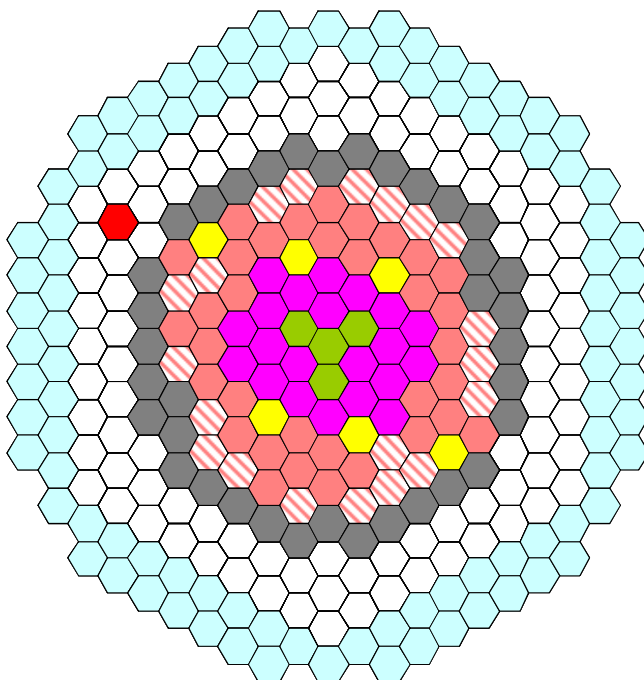




初臨界達成（平成15年7月2日）

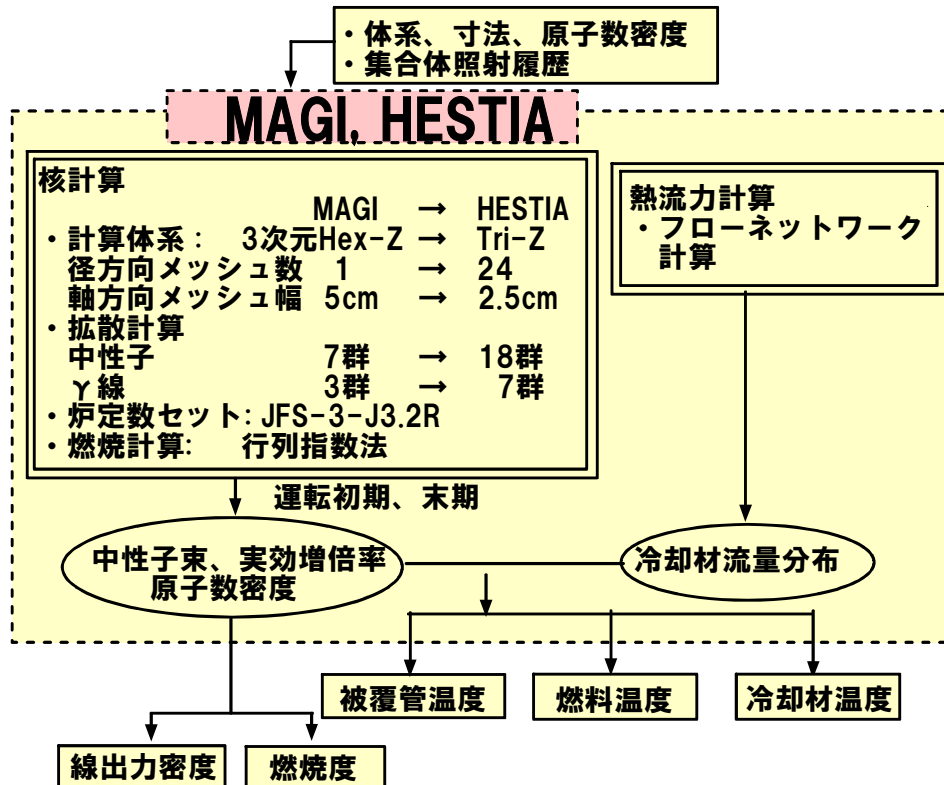


性能試験用炉心構成



	体数
MK-III 内側燃料	21
MK-III 外側燃料	54
外側燃料54体のうち、20体はMK-III移行炉心である第32～35Cyで、燃料領域を段階的に拡大するため先行して装荷	
内側反射体	36
外側反射体	93
制御棒	6
中性子源	1
材料照射用反射体	4
遮へい集合体	96

炉心管理コード計算フロー



過剰反応度の予測結果と測定結果

ゼロ出力250℃

1. MK-III炉心管理コードシステム“HESTIA”+バイアス補正
: 3.13 ± 0.16 %Δk/kk'
2. MK-II炉心管理コードシステム“MAGI”+バイアス補正
: 3.04 ± 0.15 %Δk/kk'
3. JUPITER標準解析手法(JFS-3-J3.2R)+バイアス補正
: 3.36 ± 0.18 %Δk/kk'
4. JUPITER標準解析手法+統合炉定数(ADJ2000R)
: 2.79 ± 0.34 %Δk/kk'
5. モンテカルロ法(MCNP、FSXLIB-J3R2)+バイアス補正
: 3.16 ± 0.13 %Δk/kk'

誤差1σ

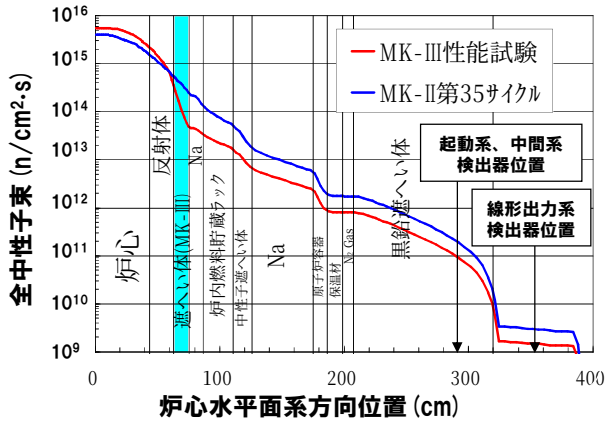
測定は臨界法で、制御棒挿入分の反応度価値の和より算出

測定値: 2.99 ± 0.09 %Δk/kk' (250℃)

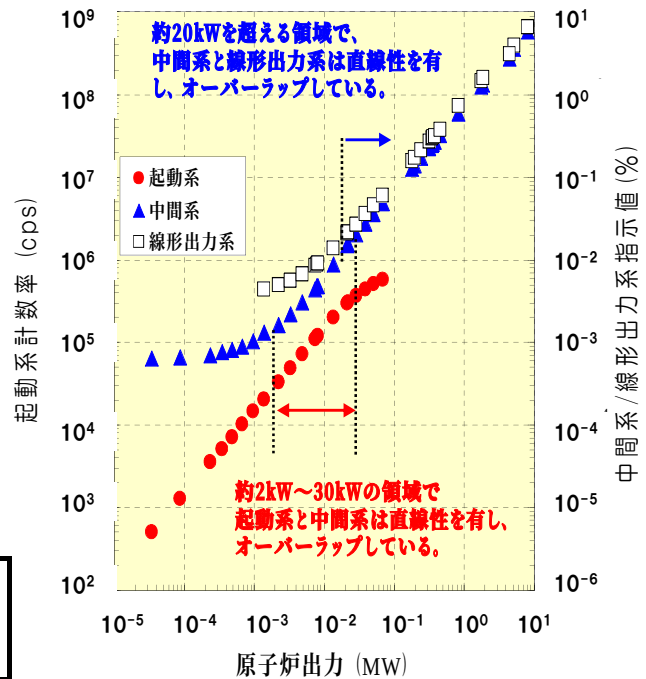


核出力校正

輸送計算結果



	検出器応答比 (MK-III/MK-II)		C/E
	解析値	実測値	
中間系	0.34	0.45	0.76
線形出力系	0.36	0.45~0.50	0.72~0.80



核計装のオーバーラップ
領域確認結果



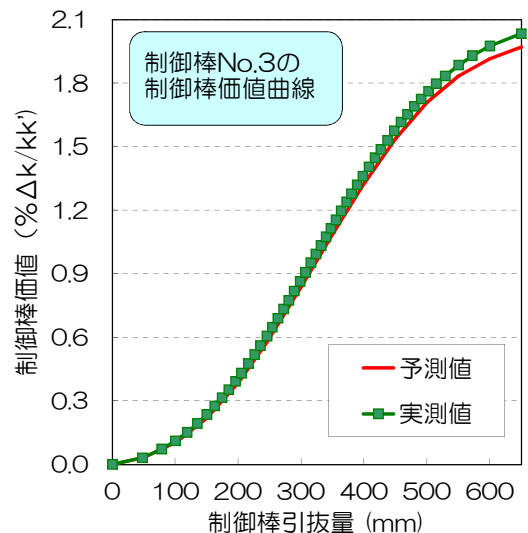
制御棒反応度価値の予測結果と測定結果

制御棒反応度価値の予測解析手法

- ・ 解析方法 基準解析手法：XYZ体系輸送計算 (TRITAC)
エネルギー群：7群
炉定数：JENDL-3.2に基づくJFS-3-J3.2R
実効断面積：1次元リングモデル
バイアス補正：MK-II第35サイクル測定値
- ・ ペリオド法測定時の制御棒位置を模擬

制御棒 No.	実測値 (E) (%Δk/k')	予測値 (C) (%Δk/k')	C/E
1	2.00 ±0.07	1.91	0.96
2	0.76 ±0.03	0.75	0.98
3	1.98 ±0.07	1.92	0.97
4	1.99 ±0.07	1.92	0.96
5	0.74 ±0.03	0.74	0.99
6	2.00 ±0.07	1.92	0.96

(誤差：1σ)





等温温度係数の予測結果と測定結果

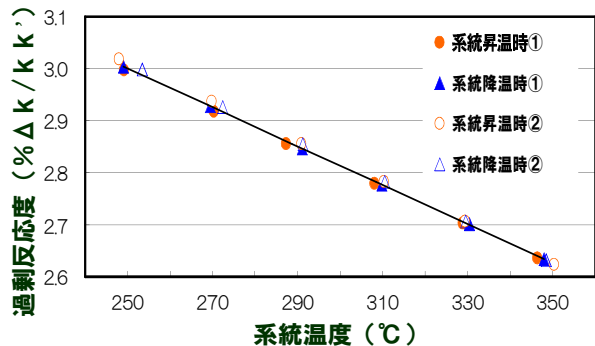
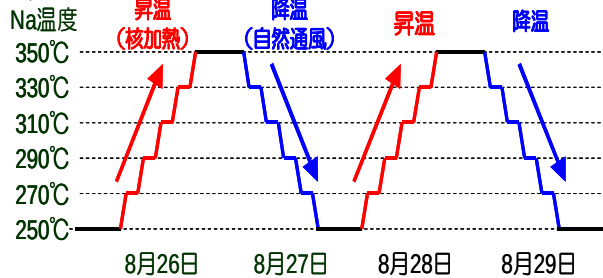
解析手法：JUPITER標準解析手法

- ・炉定数：JFS-3-J3.2R
- ・基準計算：ドップラ反応度： 3D Tri-Z 70群厳密摂動計算（PERKY）
(250℃→350℃)
膨脹反応度： 3D Tri-Z 70群直接計算（CITATION）
(250℃→350℃)

解析結果：ドップラ反応度： $-5.34 \times 10^{-4} \% \Delta k / kk' / ^\circ C$
膨脹反応度： $-3.15 \times 10^{-3} \% \Delta k / kk' / ^\circ C$ $\rightarrow$ $-3.68 \times 10^{-3} \% \Delta k / kk' / ^\circ C$

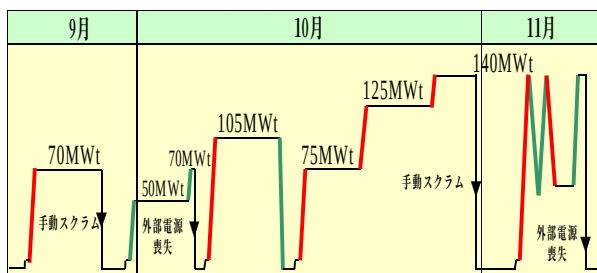
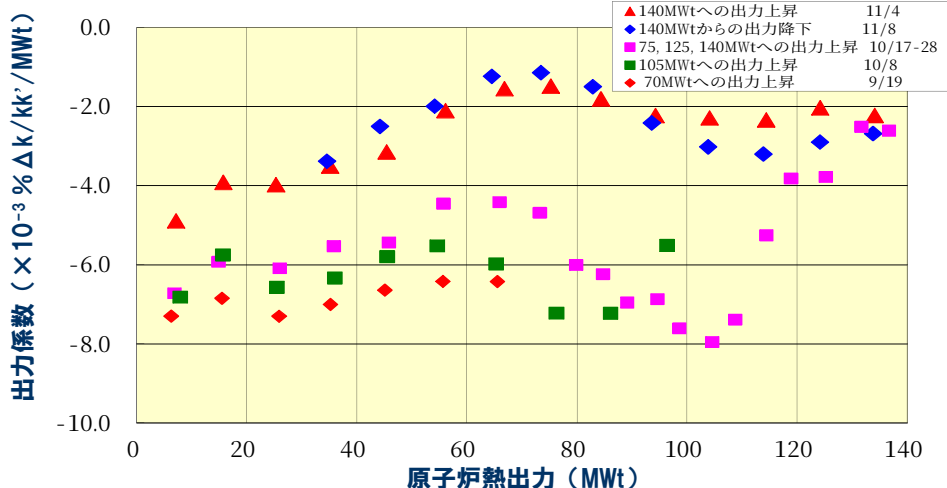
等温温度係数： $-3.82 \times 10^{-3} \% \Delta k / k k' / ^\circ C$ C/E=0.96

原子炉出入口



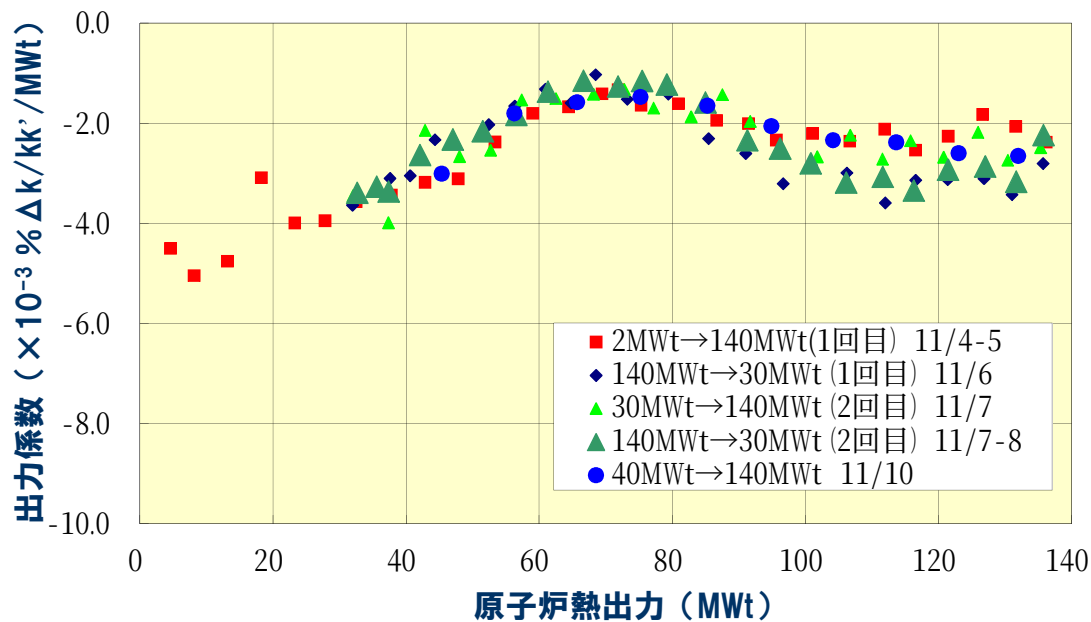
出力係数測定 (1/2)

・5または10MWt毎に熱出力を安定させて過剰反応度を測定し、出力係数を求めた。



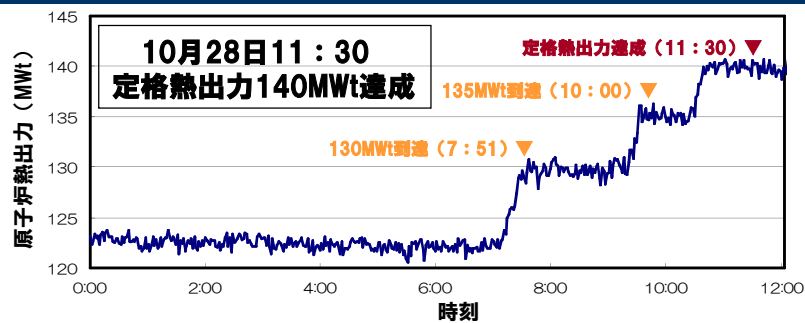
- ・全原子炉熱出力の範囲で、出力係数は負。
- ・125MWtからの出力上昇時に出力係数の絶対値減少。
- ・燃焼度依存性を確認。

出力係数測定 (2/2)



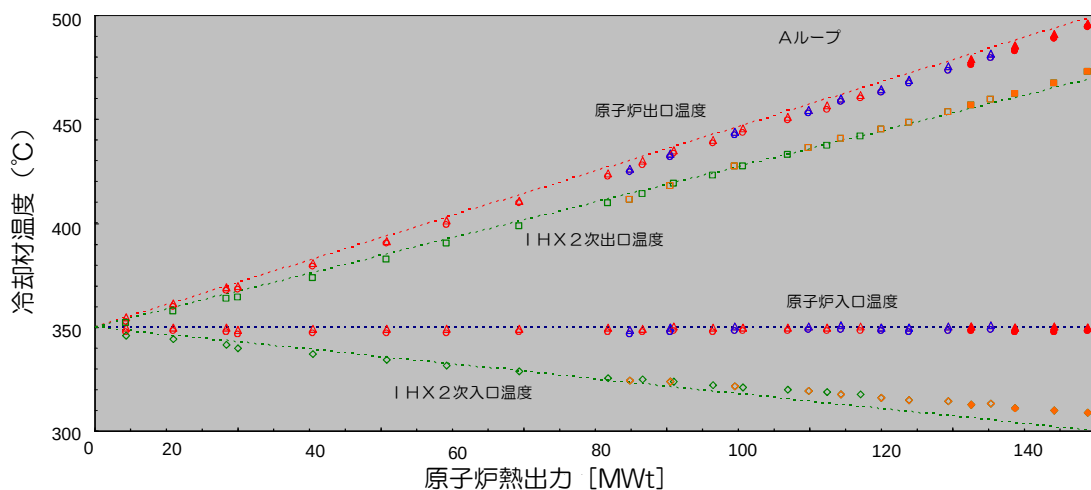
・連続的に原子炉熱出力を上昇・降下させ、出力係数を測定し、出力依存性の再現性を確認。

出力上昇試験

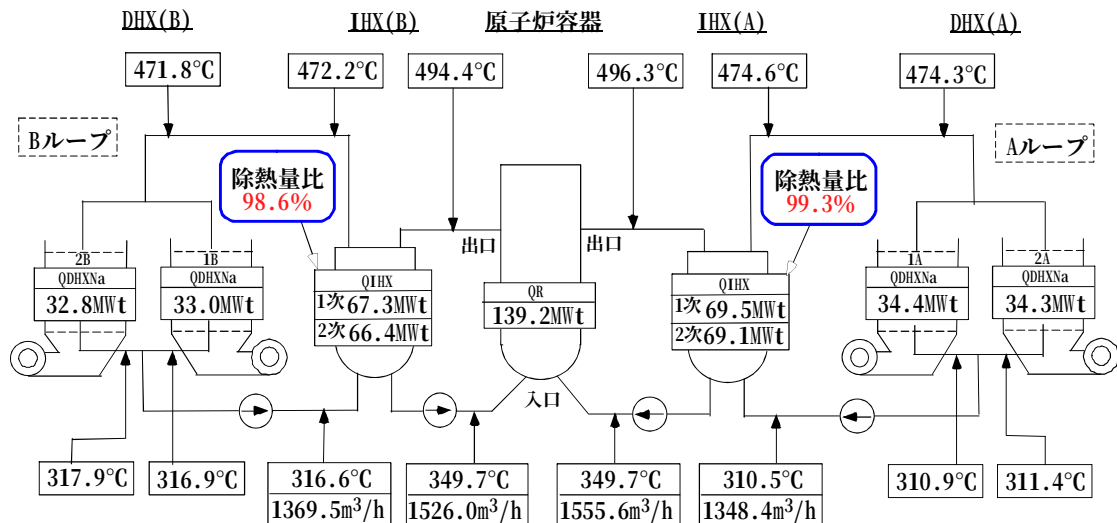


各出力段階で冷却系除熱能力を確認。

R/V入口温度が350℃となるよう、主冷却器出口温度を設定。



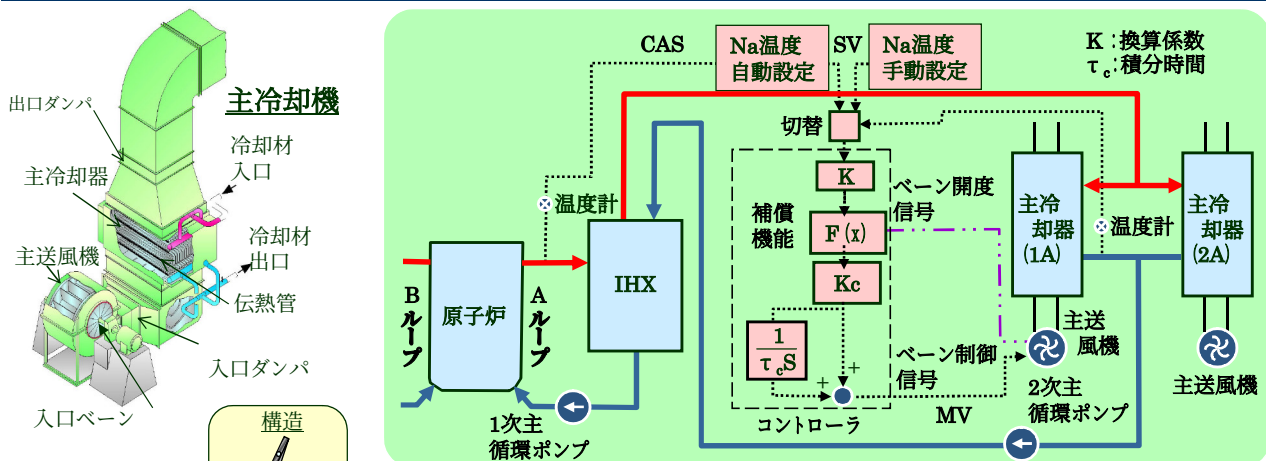
定常伝熱特性試験



ヒートバランス (原子炉熱出力約140MWt)

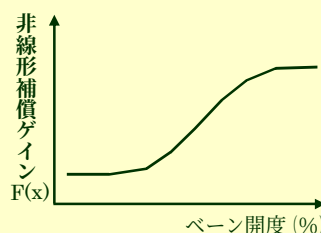
冷却系が定格140MWtの除熱能力を有することを確認

冷却材温度制御系の概要



冷却材温度制御系の概要

<比例ゲインの非線形補償機能>



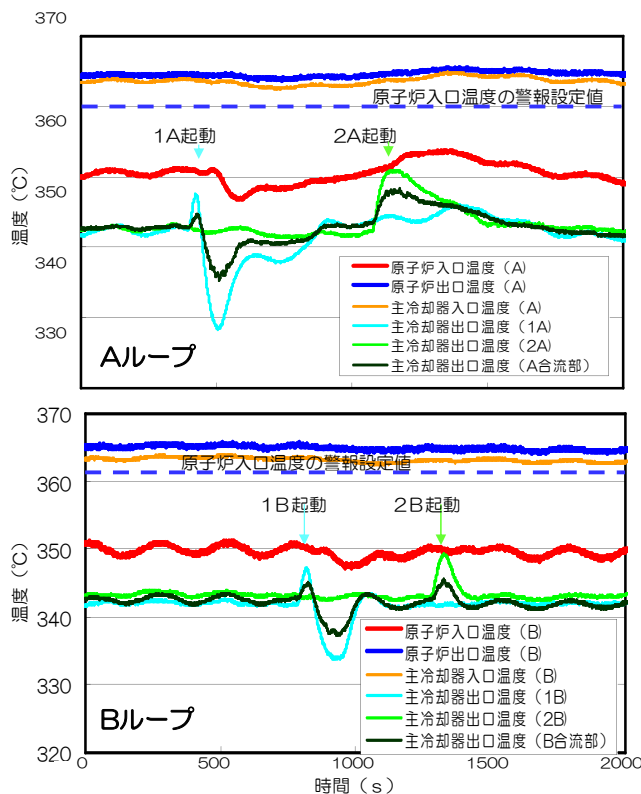
非線形な主送風機の除熱特性を補償し、安定な制御を行う

$$K_p \text{ (比例ゲイン)} = K_c \text{ (固定ゲイン)} \times F(x) \text{ (非線形補償ゲイン)}$$

<主送風機の除熱特性>
静的ゲイン：ベーン開度変化に対する除熱能力の変化割合



主送風機起動特性確認試験



主送風機起動前プラント状態
制御モード：「A」（自然通風冷却）

制御モード：「M」切替
主送風機ベーン全閉操作

主送風機起動操作
(ベーン全閉状態)

制御モード：「A」切替
(ベーン開度自動調整)

起動完了、出力上昇
制御モード：「A」（強制冷却）

主送風機
1基ずつ
4基起動

A：オート
M：マニュアル

原子炉熱出力をパラメータとして試験実施

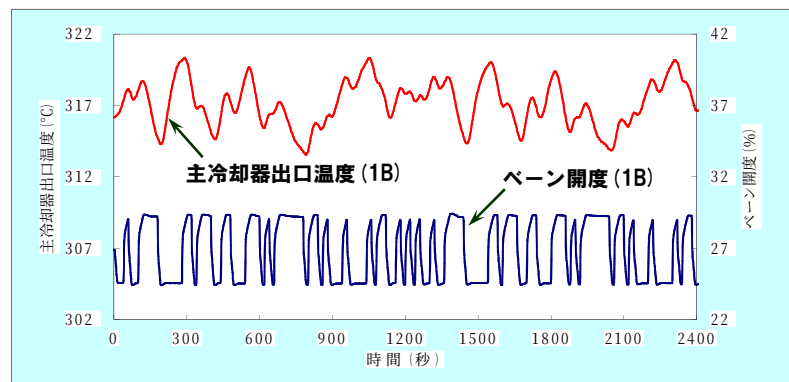
- 主送風機起動時熱出力=18MW t
- 1A⇒2A⇒1B⇒2Bの順に起動
- 運転マニュアルに反映



M系列 (Maximum-Length-Sequence) 試験

冷却材温度制御系にM系列番号投入

プラント各部冷却材温度
の応答測定



試験結果 (1 B)

130MWtでの試験結果

原子炉熱出力 (MWt)	ゲイン余裕 (dB)	ベーン開度 (%)	比例ゲイン	積分定数 (秒)
40	15	4	0.4	80
50	14	5	0.4	80
60	14	7	0.4	80
75	13	11	0.5	80
95	10	16	0.8	80
115	10	23	0.9	80
130	10	27	1.1	80

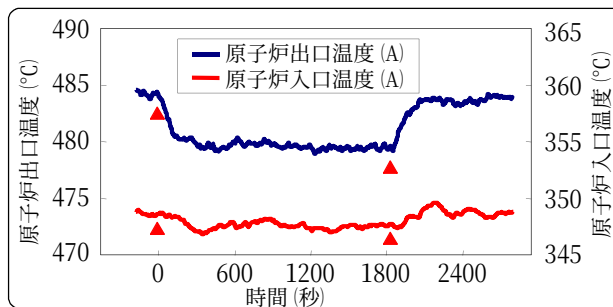
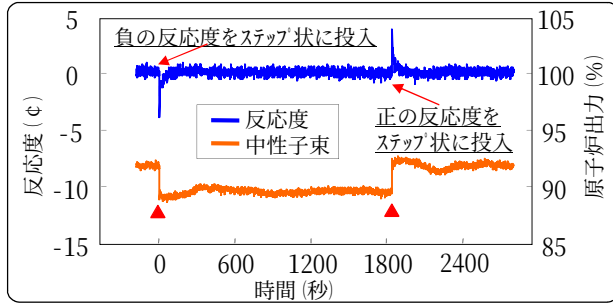
比例ゲインをMK-IIの約1/2に設定

MK-II (7~15 dB) と同等のゲイン余裕確保

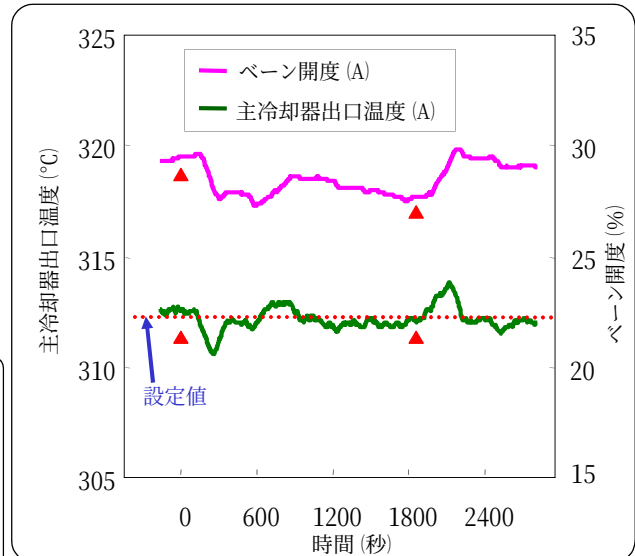
制御棒小引抜・挿入応答試験

制御棒操作により、±約5 MW t の出力変動に相当する反応度（±10 ϕ以下）をステップ状に印加し、プラント各部の応答を確認

130MWtにおける試験結果



原子炉出入口温度変化 (Aループ)

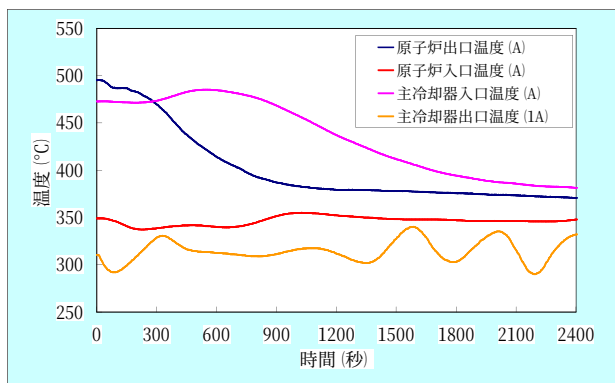


主冷却器出口 (1A)

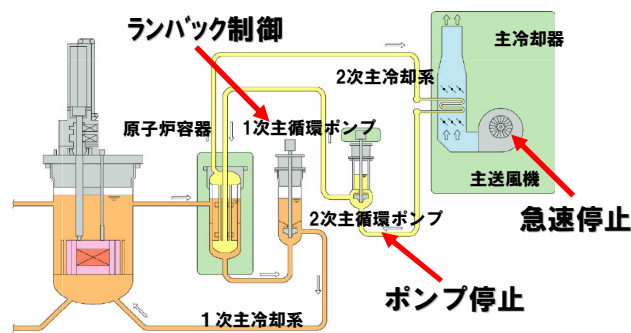
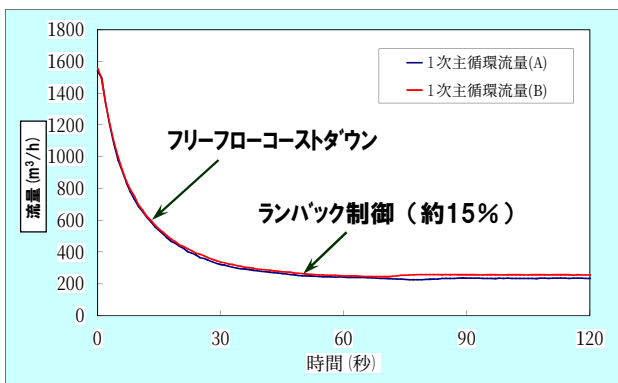
安定な制御特性を有していることを確認

140MWt 手動スクラム試験 (1/2)

冷却系各部の温度特性



1次系流量特性



各インターロックが正常に動作し、ランバック制御により、過大な熱過渡を生じることなく、原子炉を安全に停止でき、崩壊熱を除去できることを確認



140MWt 手動スクラム試験（2/2）

冷却系機器インターロックを変更

- ・ 1次主冷却系 : 定格流量 → ランバック制御による運転
- ・ 2次主冷却系 : 定格流量 → 自然循環流量（主ポンプ停止）、主送風機急速停止



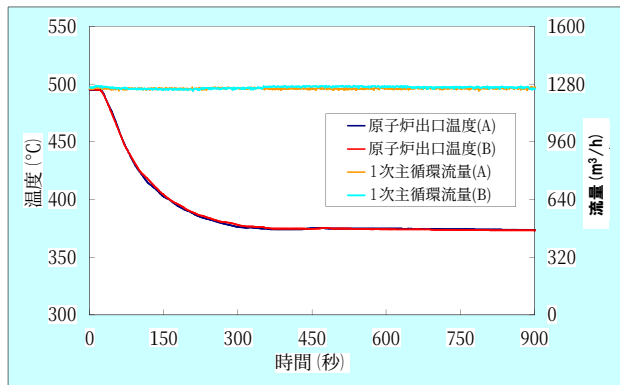
原子炉スクラム時の熱過渡を大幅に改善

<原子炉出口温度の温度変化率（℃/秒）>

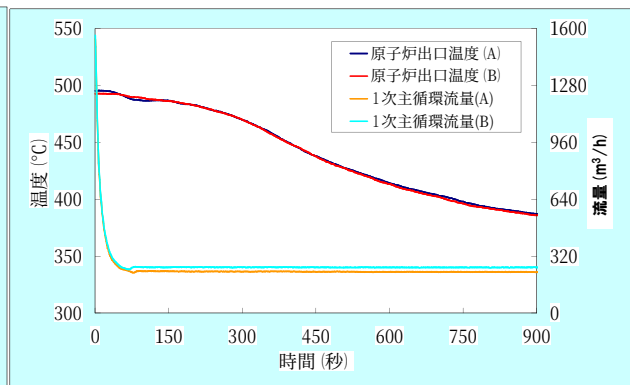
A ループ : -1.19 (MK-II) → -0.23 (MK-III)

B ループ : -1.10 (MK-II) → -0.21 (MK-III)

MK-II 140MWt手動スクラム試験

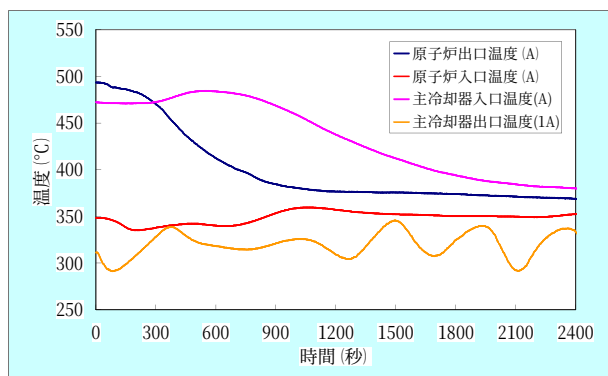


MK-III 140MWt手動スクラム試験

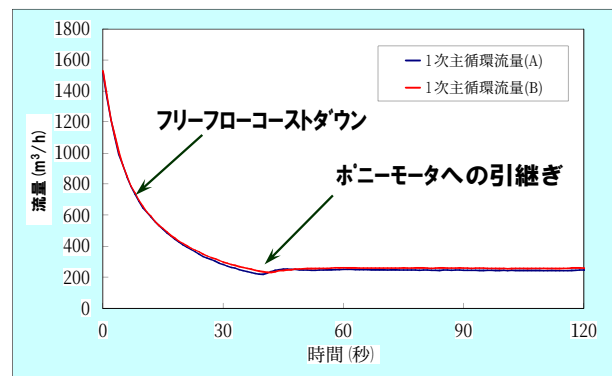


140MWt 外部電源喪失試験

冷却系各部の温度特性



1次系流量特性



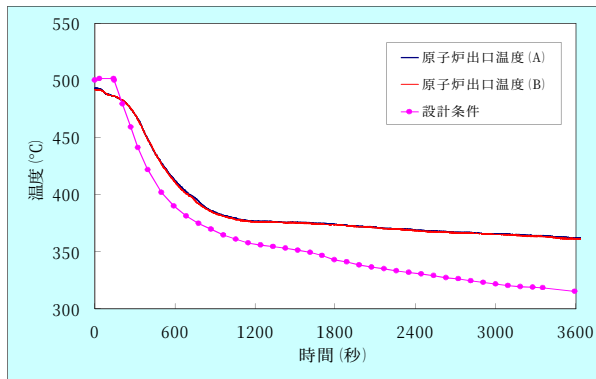
電源喪失により照明
が消えた中央制御室



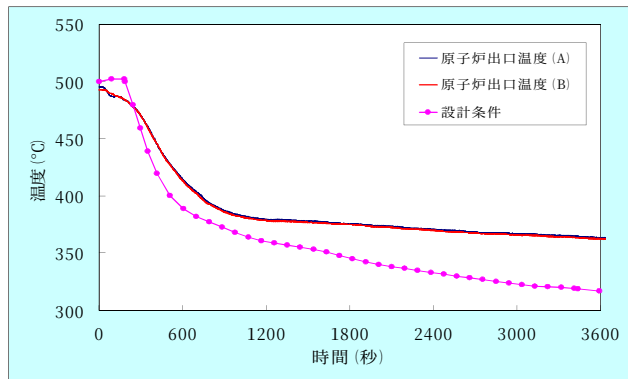
DG起動

原子炉スクラム、ポニーモータ引継
及び各インターロック動作が正常に
行われ、過大な熱過渡を生じること
なく、原子炉停止後の崩壊熱を除去
できることを確認。

外部電源喪失



手動スクラム



原子炉出口温度		最大温度変化幅(℃)		最大温度変化率(℃/秒)	
		設計値	実測値	設計値	実測値
外部電源喪失	Aループ	-147.0	-117.4	-0.33	-0.24
	Bループ		-116.0		-0.22
手動スクラム	Aループ	-146.5	-108.0	-0.38	-0.23
	Bループ		-114.8		-0.21

熱過渡が設計値を満足することを確認

使用前検査合格（平成15年11月27日）



性能試験結果とその活用

1. 設計性能の確認（試験炉則第3条の5に定める性能基準等との比較）
⇒ 炉心・プラント設計の妥当性を確認 ⇒ 使用前検査合格
2. 運転パラメータの取得
 - ① 安全運転のためのデータ（温度制御系の設定、主送風機起動手順等）
⇒ 運転マニュアル、運転訓練シミュレータに反映
 - ② 運転管理・監視のための定常時データ
（核計装信号、空間線量率、燃料破損系検出信号等）
⇒ 運転マニュアル、運転訓練シミュレータに反映
⇒ 通常運転時のバックグラウンドの把握（異常検知の基礎データ取得）
3. 照射炉としての基本特性の確認
 - ① 炉心管理のためのデータ（過剰反応度、反応度係数等）
⇒ 炉心管理コードに反映 → 燃料管理、炉心特性予測精度向上
 - ② 照射条件評価精度向上のためのデータ（中性子束分布、流量分布等）
⇒ 照射条件評価手法に反映
→ 高品質な照射データ（中性子束、温度等）提供

「もんじゅ」との連携

MK-III性能試験には「もんじゅ」及び国際技術センターから計16名の技術者が参加。

試験要領書作成、試験実施、データ分析・評価等、一連の作業を通じ、技術的経験蓄積。

来るべき「もんじゅ」運転再開後の性能試験への反映を期待。



- MK-III改造終了後、原子炉を起動して、定格140MWtを達成し、最終の使用前検査に合格した。
- 炉心・プラント特性等に係る一連の性能試験を実施し、設計性能を確認するとともに、核的制限値をはじめとするすべての制限値が満足されることを確認した。
- 試験結果に基づき、運転マニュアルの整備、炉心管理コードシステムの解析精度検証、運転管理・監視のための定常時バックグラウンドデータの取得等を行った。
- 改造後に実施した一連の試験を通じて得られた知見・経験を「もんじゅ」の運転再開に活かしていく。



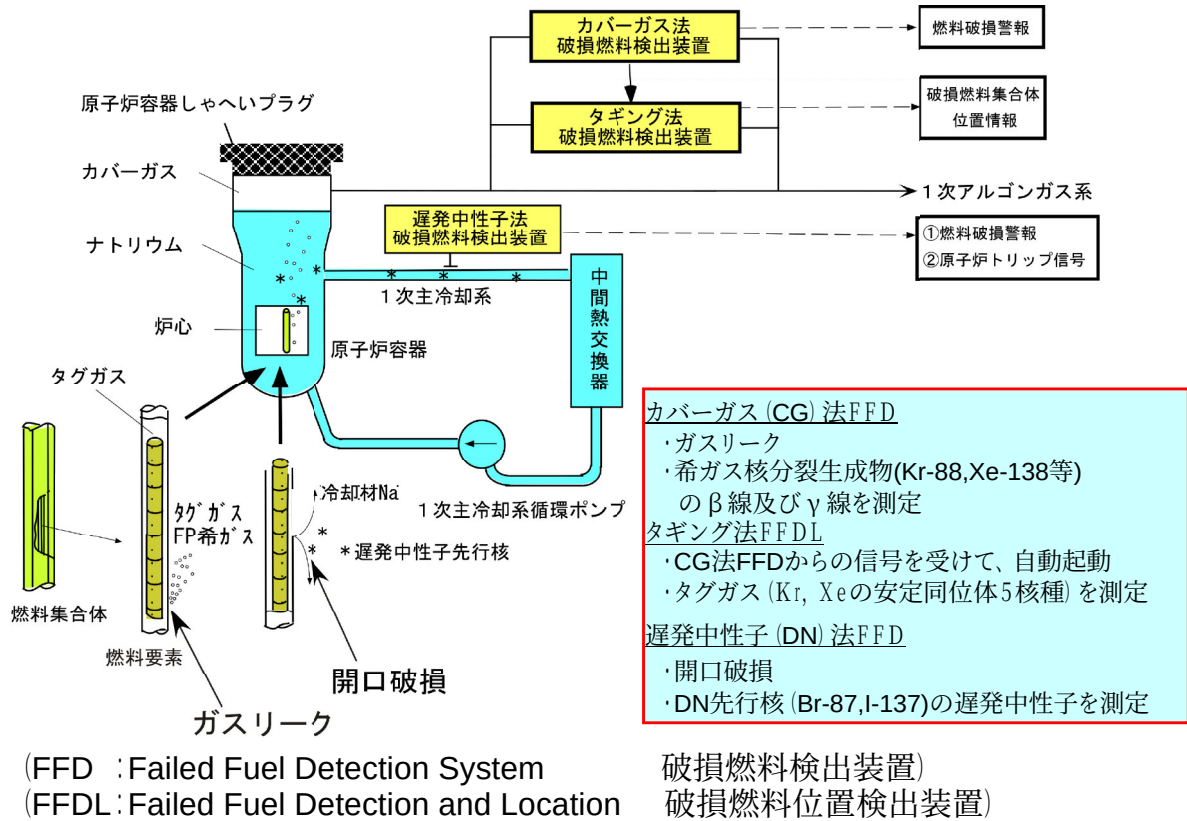
タギング法破損燃料検出装置の改良の検討 ータギング法破損燃料検出装置モックアップ試験の概要ー

核燃料サイクル開発機構 敦賀本部
もんじゅ建設所
技術課
斉藤 裕行

発表内容

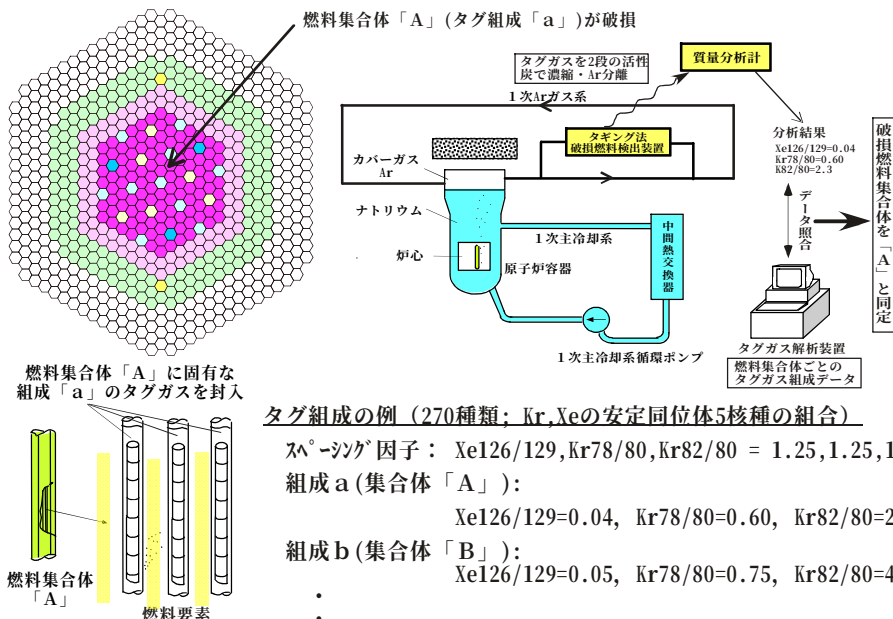
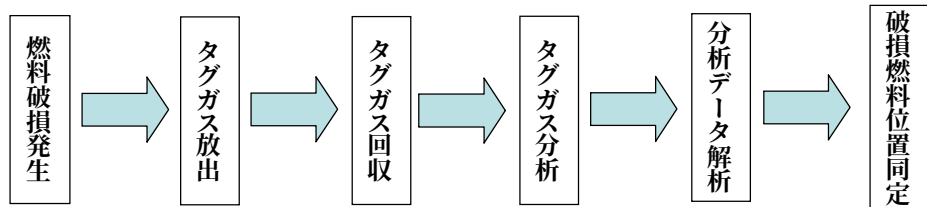
- I. 破損燃料検出装置の概要
- II. タギング法FFDLの開発目標
- III. FFDLの目標を達成する方法
- IV. モックアップ試験結果
- V. FFDL運転方法改良案
- VI. モックアップ試験のまとめ
- VII. 今後の計画

I. 破損燃料検出装置の概要



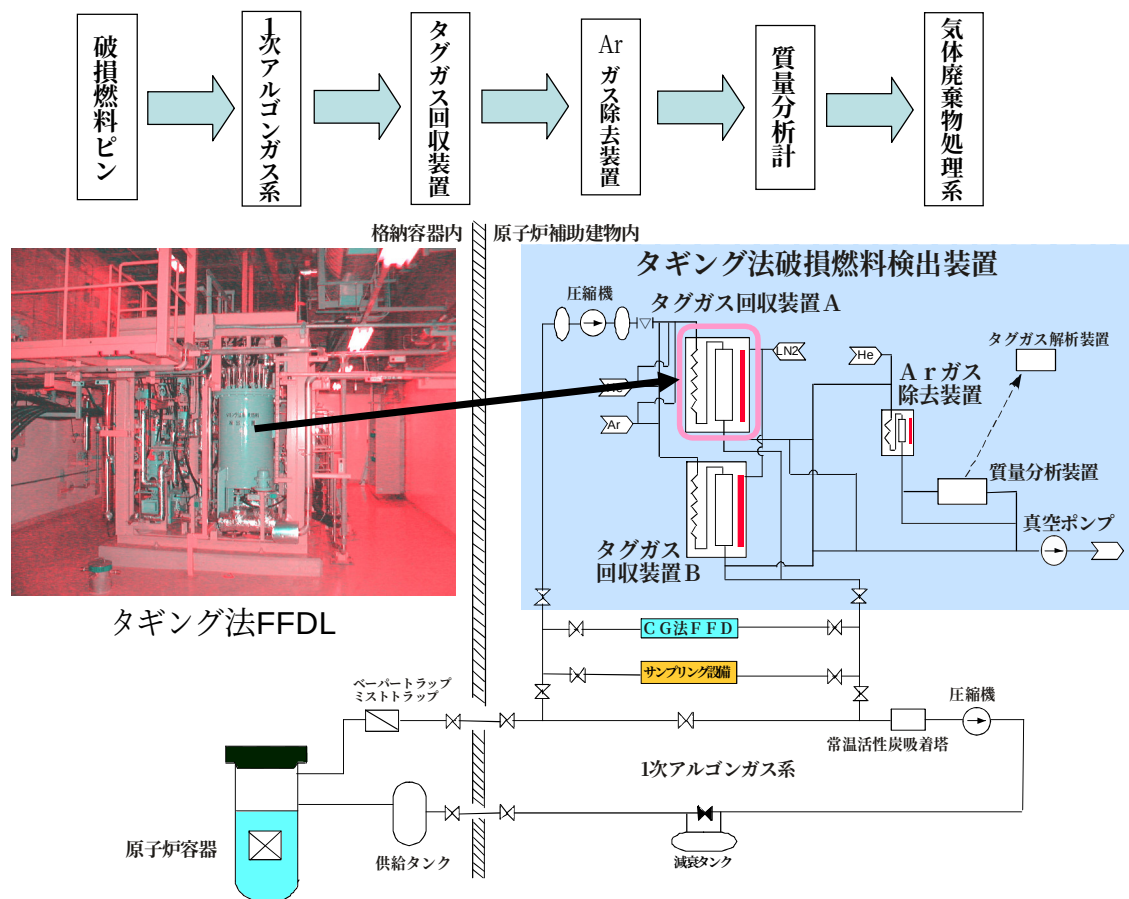
3

(1) タギング法FFDLの概要



4

(2) タギング法FFDLの運転フロー



5

II. タギング法FFDLの開発目標

平成9年度に、タギング法FFDL (実機) を用いて、微量のKrとXeを含んだ試料ガス (Kr+Xe濃度: 数ppm) を使って、KrとXeの濃縮率を確認する試験を行った。

Krの濃縮率は、Xeの濃縮率に比べ1/90～1/400の濃縮率であった。

燃料破損により1次アルゴンガス系に放出されるタグガス中のKrは、さらに濃度が低いため、上記Krの濃縮率では、分析することができない。

よって、現状は、タグガス中のXeを分析し同定できる被疑燃料集合体の数は、約22体

(燃料集合体198体÷Xeタグ9種類=22体)

開発目標: Krの濃縮率を向上させることにより、被疑燃料集合体1体を同定可能とする。

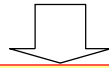
6

III. タギング法FFDLの目標を達成する方法

(1) モックアップ試験に至る経緯

タギング法FFDL (実機) を用いた試験の問題点

- ① 質量分析計で、連続した分析ができない。
(質量分析計の更新に合わせて解決済み)
- ② タグガス回収装置とArガス除去装置の独立したデータを取ることが難しい。
- ③ タギング法FFDL (実機) を改造することが困難。



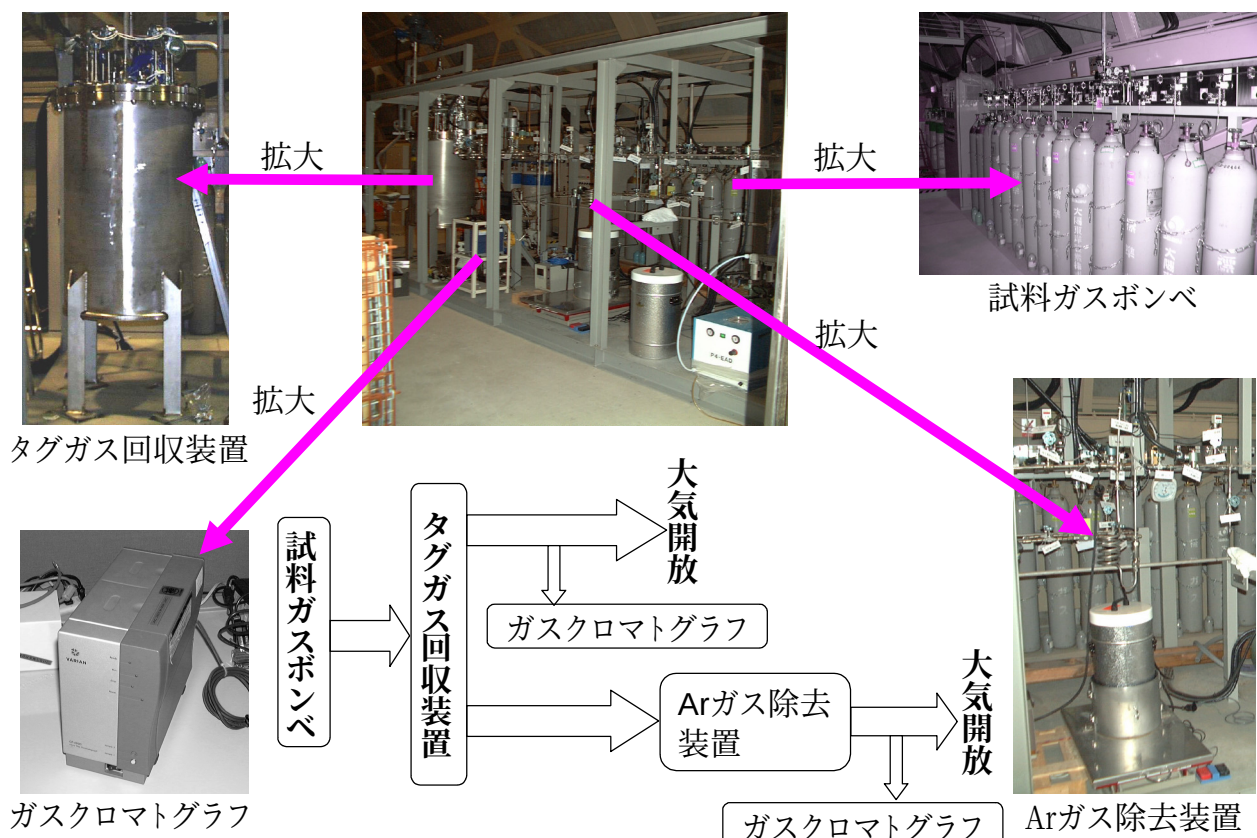
実規模大のモックアップ装置を製作し、FFDLの運転方法を確認・検証する。

(2) モックアップ試験の内容

- ① タギング法FFDL (実機) と同じ運転を行い、Krの濃縮率がXeの濃縮率より低い原因を確認。
- ② 運転方法を変更し、Krの濃縮率が向上することを確認。
- ③ タグガス回収装置からの移送方法についても、上記①②と同様の試験を行い、タグガス濃縮率が向上することを確認。

7

(3) モックアップ試験装置の外観

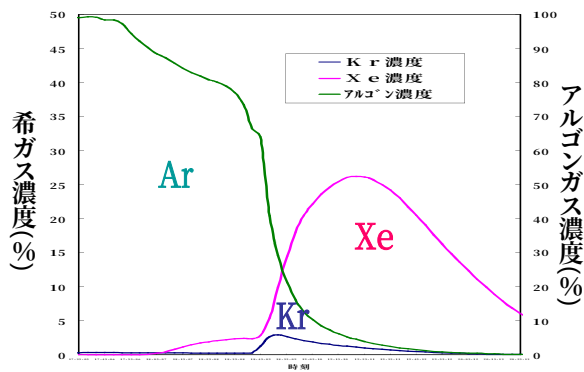


8

IV. モックアップ試験結果

(1) タグガス回収時活性炭温度の違いによるタグガス濃度の違い

測定方法: タグガス回収装置出口の希ガス濃度を測定。

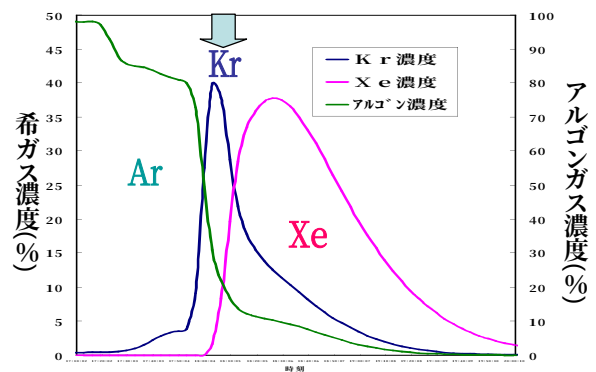


活性炭加熱後の時間

活性炭吸着塔表面温度: -180°C

活性炭吸着塔入口圧力: 0.1MPa

現状 (-180°C , 約 1.1 気圧のためArが液化し吸着量少ない。)



活性炭加熱後の時間

活性炭吸着塔表面温度: -160°C

活性炭吸着塔入口圧力: 0.1MPa

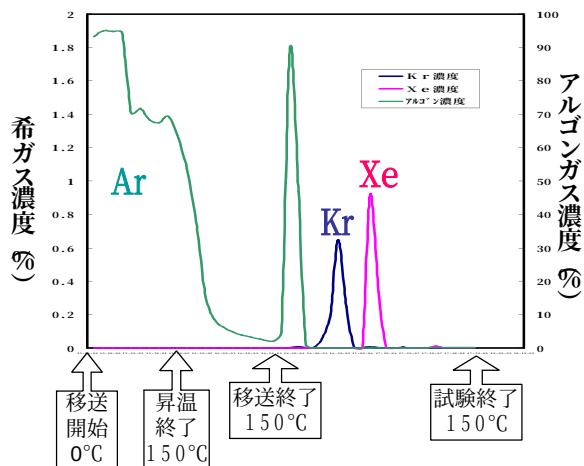
活性炭吸着塔温度を -160°C に変更したためArが液化せず吸着量多い。

タグガス回収温度の変更によりKrの濃縮率が大幅に向上した。

9

(2) タグガス移送方法の違いによる希ガス濃度

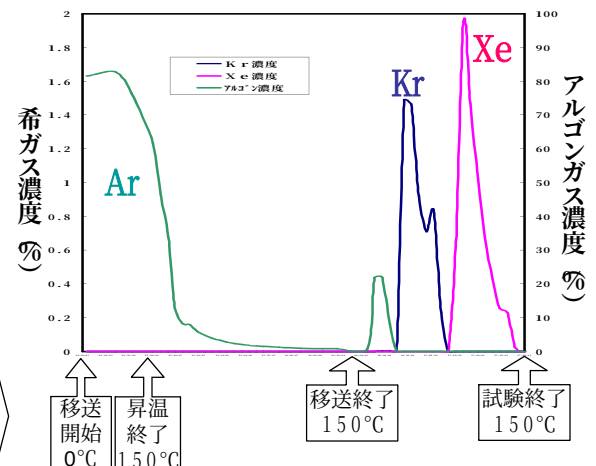
測定方法: アルゴンガス除去装置出口の希ガス濃度を測定。



タグガス移送時の時間

- 活性炭吸着塔温度を、移送開始前に一定温度(0°C)保持(40分)後、昇温(移送開始)
- タグガス回収装置からの移送時間: 80分

現状の移送方法



タグガス移送時の時間

- 活性炭吸着塔温度を、移送開始前に一定温度保持せず、連続的に昇温(移送開始)
- タグガス回収装置からの移送時間: 120分

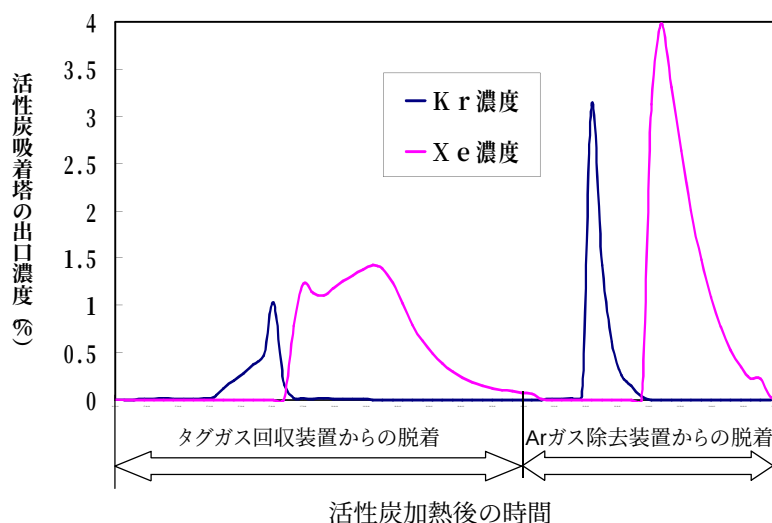
改良した移送方法

タグガス回収装置の加熱運転変更によりタグガスの濃縮率が向上した。

10

V. FFDL運転方法改良案

(1) FFDL運転方法改良時の希ガス脱着特性(予想)



運転方法(従来)

- 活性炭吸着塔温度・・・ -180°C
- 活性炭吸着塔加熱運転・・・ $-180^{\circ}\text{C} \rightarrow 0^{\circ}\text{C}$ (40分保持) $\rightarrow 150^{\circ}\text{C}$
- タグガス回収装置からの移送時間・・・80分

運転方法(改良後)

- 活性炭吸着塔温度・・・ -170°C
- 活性炭吸着塔加熱運転・・・ $-180^{\circ}\text{C} \rightarrow 150^{\circ}\text{C}$ (連続昇温)
- タグガス回収装置からの移送時間・・・120分

11

VI. モックアップ試験のまとめ

FFDLの運転方法を変更することで、Kr濃縮率(ピーク濃度)^{注)}が約3000倍になることが判った。

上記、Kr濃縮率を実機タギング法FFDLに適用した場合、質量分析計でKrを分析できることが判った。

タグガス中のKrを分析・定量できる見通しが得られた。
⇒被疑燃料集合体の1体まで同定が可能となる。

注) $\text{Kr濃縮率(ピーク濃度)} = \frac{\text{FFDL運転中のKr濃度(ピーク時)(ppm)}}{\text{試料ガス中のKr濃度(ppm)}}$

12

VII. 今後の計画

① タギング法FFDLの改造

モックアップ試験で有効とされた運転方法を実行するため、実機を改造する。

② タギング法FFDLの活性炭吸脱着特性の把握

改造後の実機のタグガス回収装置とArガス除去装置の各活性炭吸着塔の吸脱着特性を確認する。

③ タギング法FFDLのタグガス濃縮率の確認と運転方法の最適化

吸脱着特性に基づいて実機の運転方法を調整した後、KrとXeの濃縮率を確認する。さらに、タグガス分析時間 (回収→移送→測定) 短縮等の観点から最適化を図る。



冷却材ナトリウムの迅速分析法の検討

核燃料サイクル開発機構 敦賀本部
もんじゅ建設所
安全管理課
飯島 稔

背景

★ 純度管理の必要性

⇒Naと接する燃料被覆管,容器,配管等の腐食抑制

★ 純度管理方法

⇒コールドトラップによるNaの純化

⇒フラッキング計による連続純度測定 (Na中の酸素,水素)

⇒オンラインガスクロによる連続純度測定 (Ar中の窒素,水素等)

⇒サンプリング・分析による純度測定 (Na・Ar中の酸素,水素,窒素等)

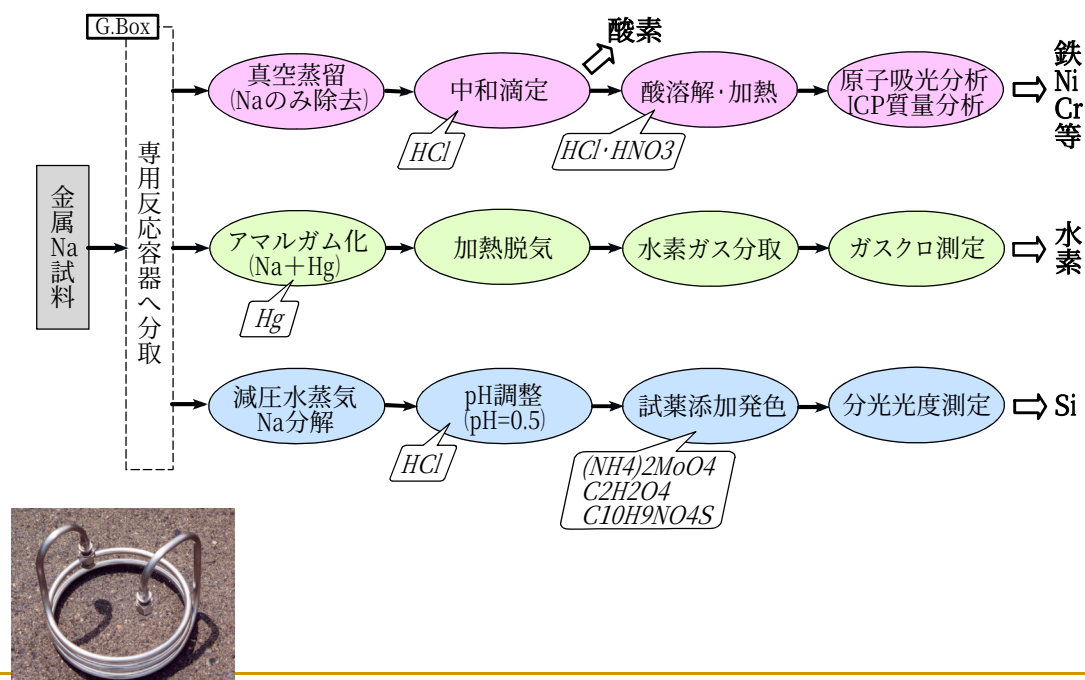
★ もんじゅの保安規定・保安規定運営要項

⇒原子炉運転・起動状態で当直長は1日1回純度を確認する
(Na中の酸素濃度管理目標値:1次系<3ppm、2次系<10ppm)

⇒フラッキング計の指示異常・純度影響操作 (P1課長→安管課長)

⇒安管課長はサンプリング・分析を実施 (結果→P1課長,技術課長)

現状のナトリウム分析法



現状方法の改善目的

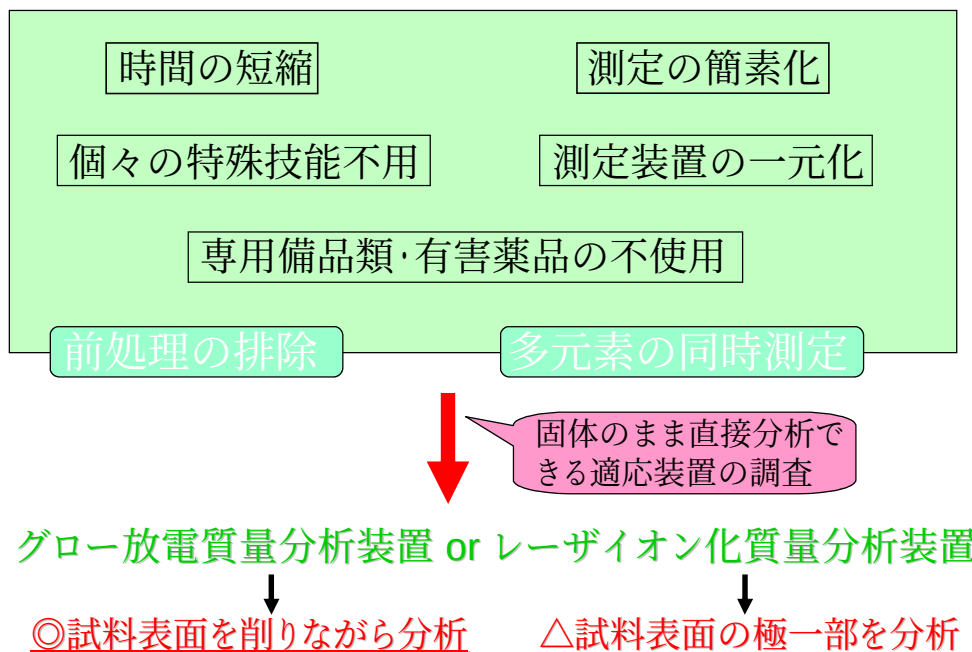
★ 分析方法の簡素化・迅速化 → プラントへの即応性向上

- ↑ 元素毎の前処理…8通り
- ↑ 特定機器での測定…ICP-質量分析計など7機種
- ↑ 複数人の熟練分析員

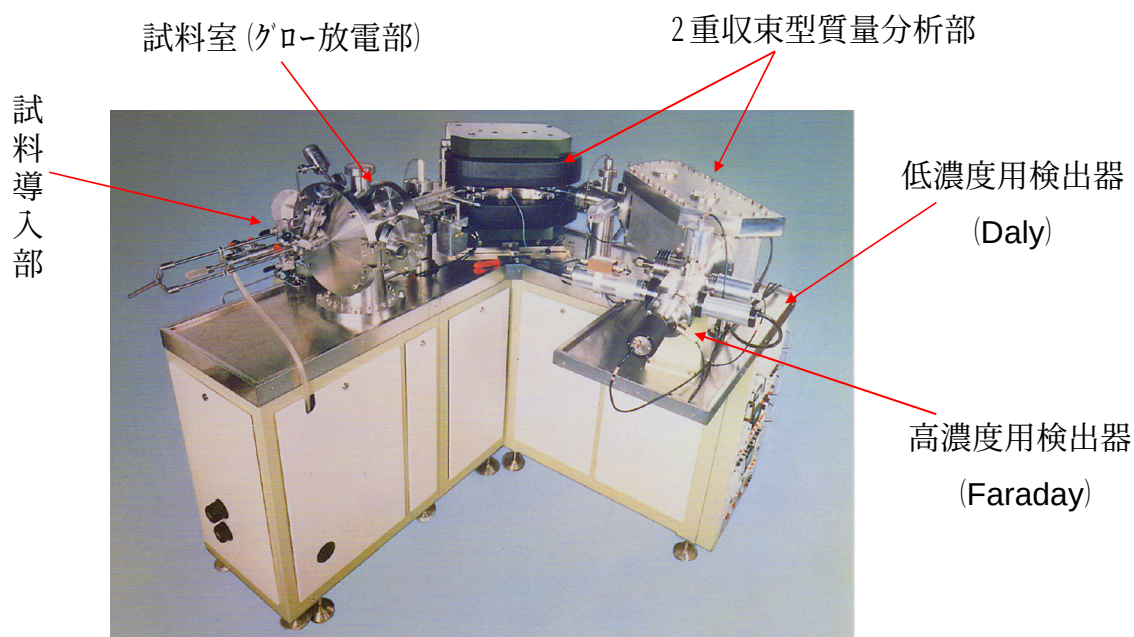
★ 有害薬品類の不使用

- ↑ 人 体…水銀, 塩酸, ニクロム酸カリウム 等
- ↑ 液体廃棄物処理系…塩酸, 硝酸, アンモニア 等

改善に向けて



グロー放電質量分析装置 (外観)



検討試験 (内容と結果)

(1) 低融点金属の分析事例

製造メーカー・国内外ユーザーについて調査

⇒ Naの事例は無いが、Ga;29.8°C, Li;180°Cの事例有り

(2) Naを用いた分析試験 (販売メーカーのデモ機借用)

① 市販Na・・・Naの脱着性・分析可否の調査

⇒ 一連の分析操作が何ら支障無くできることを確認

⇒ B,O,K,Fe,Na (母材) の同時分析可能・・・ppm～%

② 高純度Na・・・低濃度領域の測定性、従来法との比較

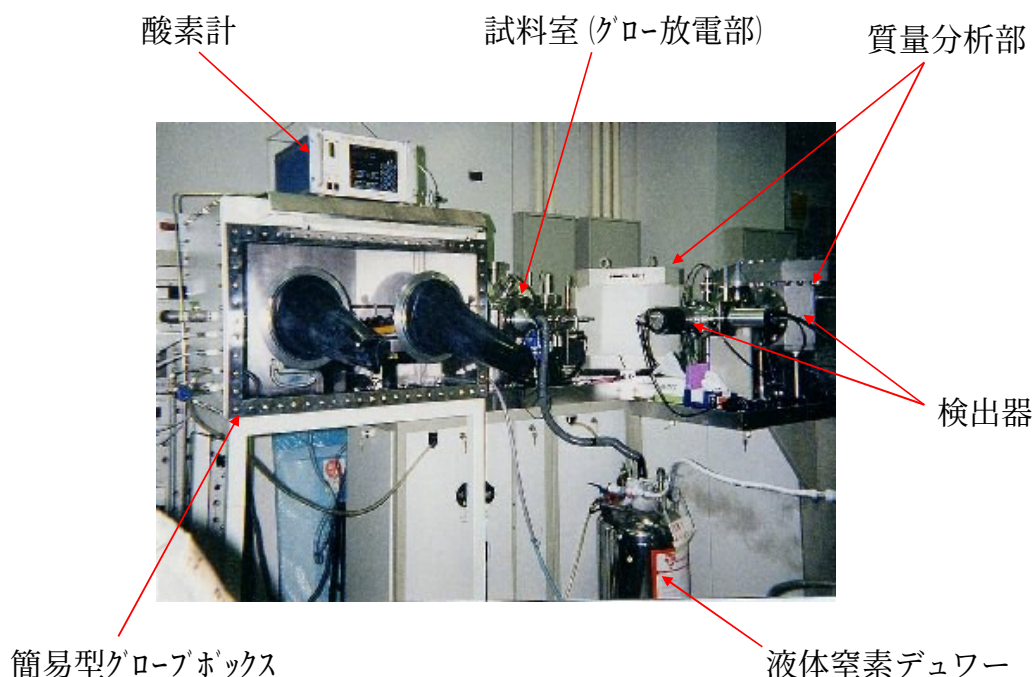
(装置導入部へグローブボックスを装着)

⇒ もんじゅ管理対象元素の同時分析可能・・・ppb～ppm

(18元素: H,Li,B,C,N,O,Mg,Al,Si,Cl,K,Ca,Cr,Mn,Fe,Co,Ni,Mo)

⇒ 約3時間で全ての安定データを取得可能

分析装置+グローブボックス (外観)



測定データ (代表例)

高純度Naの測定データ

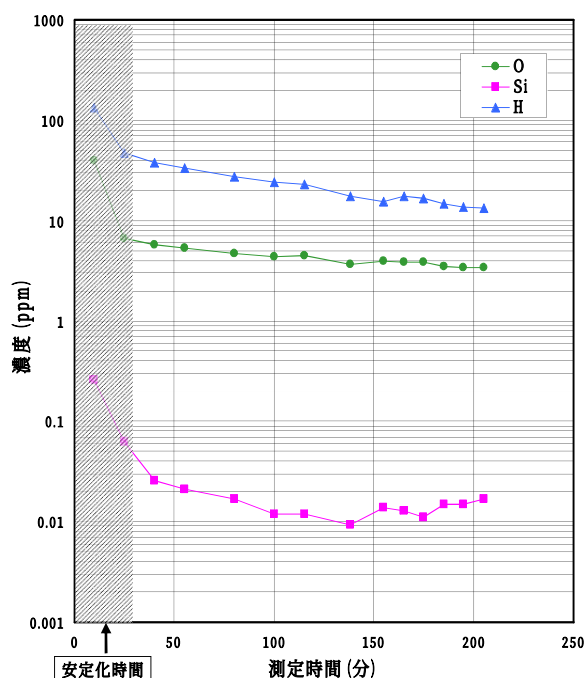
- グローボックス内酸素濃度: 8~10ppm
- 試料室供給Ar中酸素濃度: <2ppm
- 測定値: 微量元素イオン強度/Naイオン強度

従来法分析値との比較

水素・炭素・窒素・カルウム以外の14元素についてはほぼ合致

→ 標準物質による校正が必要

元素名	従来法	迅速法
酸素	1.8~3.2	3.4
水素	0.2~0.21	14
シリカ	<0.1~0.3	0.015



まとめ

グロー放電質量分析装置による金属Naの分析

固体直接・多元素同時分析可能



分析の簡素化/迅速化・測定装置の一元化



プラント運転への即応性向上
有害薬品の使用激減



標準物質による装置の校正方法確立 (測定精度向上)



もんじゅへ導入



ナトリウム漏えい対策

ー 断熱材敷設評価と床ライナの健全性評価 ー

核燃料サイクル開発機構 敦賀本部

もんじゅ建設所

プラント第二課

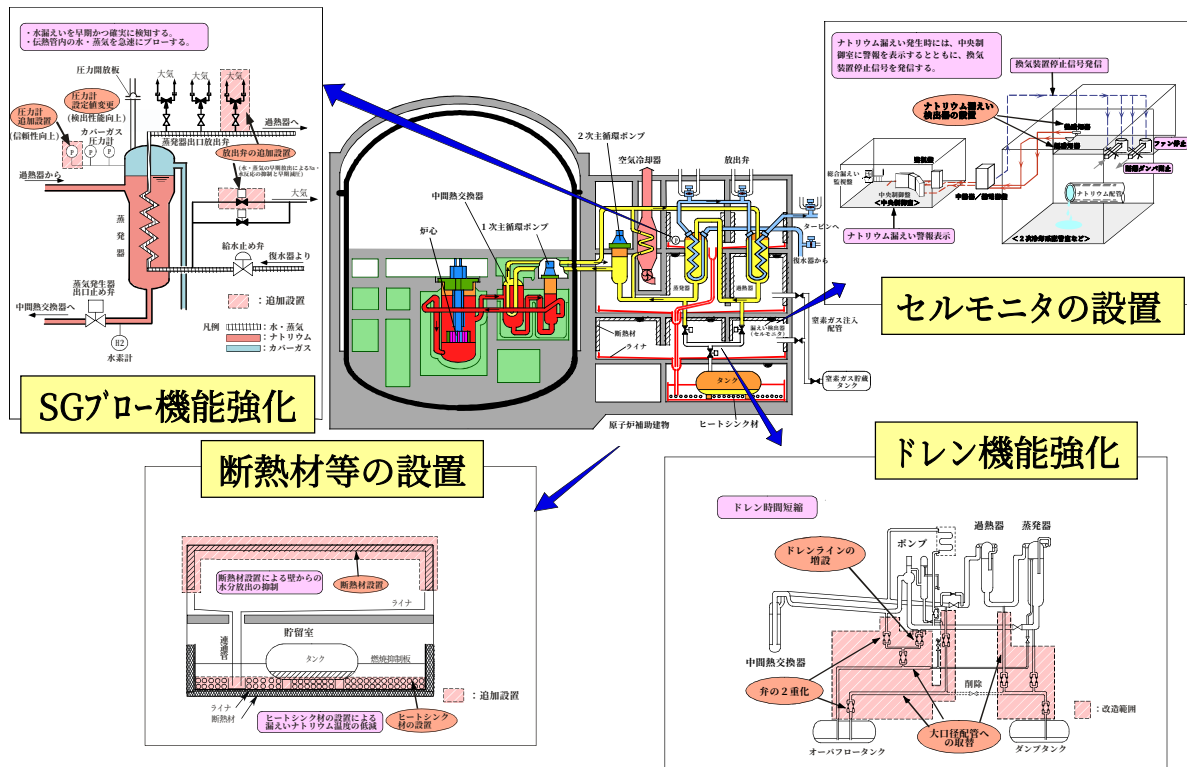
芋生 和道

目次

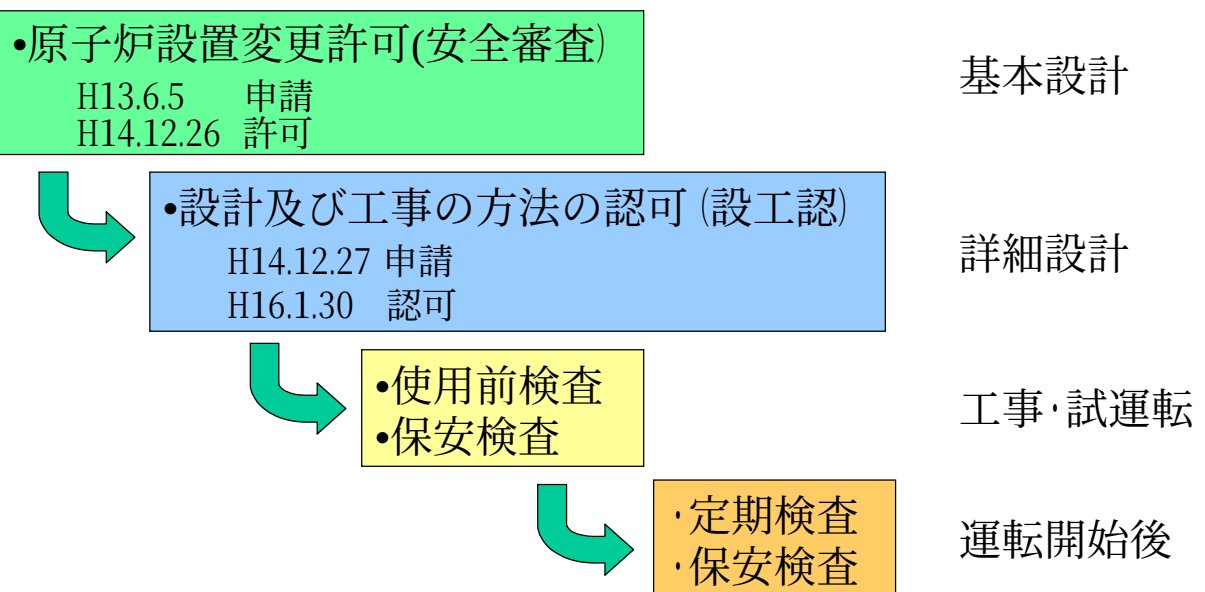
1. 設工認*の概要
2. 断熱材等の敷設評価
3. 床ライナの健全性評価

*：設計及び工事の方法の認可

ナトリウム漏えい対策に係わる設工認変更申請の概要



安全規制の流れ



安全審査後に確認すべき重要事項（安全審査の宿題）

●詳細設計段階

- － 壁等の断熱材及びヒートシンク材敷設の影響評価
- － 床ライナの健全性評価

●工事・試運転段階

- － ドレン時間の確認
- － 水・蒸気ブロー時の減圧特性の確認

重要事項の詳細

事 項		安全審査後に確認すべき項目	詳細設計段階での確認	工事・試運転段階での確認計画
ナトリウム漏えい対策	原子炉補助建物	①詳細設計段階における壁等の断熱材及びヒートシンク材の敷設状況とその影響について報告すること。	以下の項目について詳細審議を行い、ナトリウム漏えい時において熱的影響の緩和が適切に図られることを確認した。 ・ナトリウムの流出・移送過程のライナの腐食減肉の評価 ・ナトリウムの流出・移送過程の水素濃度の評価 ・貯留室の水素濃度の評価 ・タンク室の壁とライナの干渉評価	・断熱材の敷設率を確認する。 ・ヒートシンク材の重量及び敷設状況を確認する。
		②詳細設計段階における床ライナの健全性評価について報告すること。	以下の項目について詳細審議を行い、ナトリウム漏えい時において床ライナの健全性が損なわれないことを確認した。 ・床ライナと壁との干渉評価 ・熱ひずみに対する床ライナ健全性評価 ・床ライナの腐食減肉量の評価	—

目次

1. 設工認*の概要



2. 断熱材等の敷設評価

3. 床ライナの健全性評価

*:設計及び工事の方法の認可

断熱材とヒートシンク材の敷設目的

断熱材の敷設目的

- 燃焼室のコンクリート温度上昇を抑制して熱的影響を緩和
 - ⇒ コンクリートからの水分放出量を低減
 - ⇒ 水酸化ナトリウム (NaOH) 生成量を抑制 (床ライナの腐食を抑制)
 - ⇒ Naと水分との反応による燃焼室の水素濃度を抑制

ヒートシンク材の敷設目的

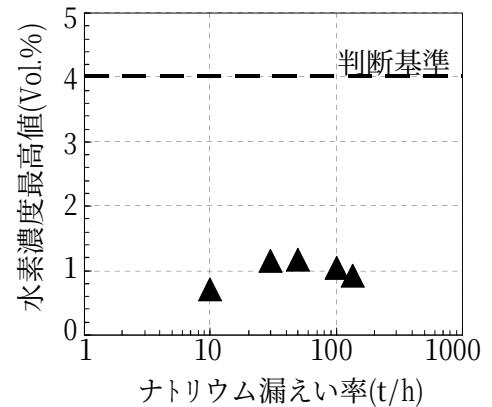
- 貯留室のナトリウムプール温度を低減して熱的影響を緩和
 - ⇒ 貯留室床ライナ温度及び床コンクリート温度上昇を抑制
 - ⇒ プール中でのNaとNaOHとの反応による水素濃度を抑制



断熱材とヒートシンク材の敷設評価（配管室A-446での漏えい想定）

断熱材の敷設評価

- 燃焼室の水素濃度は約1.2%（酸素濃度5%以上において） < 水素燃焼に関する判断基準4%（注）



ヒートシンク材の敷設評価

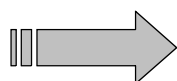
- 貯留室の水素濃度は約0.2%（酸素濃度5%以上において） < 水素燃焼に関する判断基準4%（注）

（注）出典：「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」

目次

1. 設工認*の概要

2. 断熱材等の敷設評価



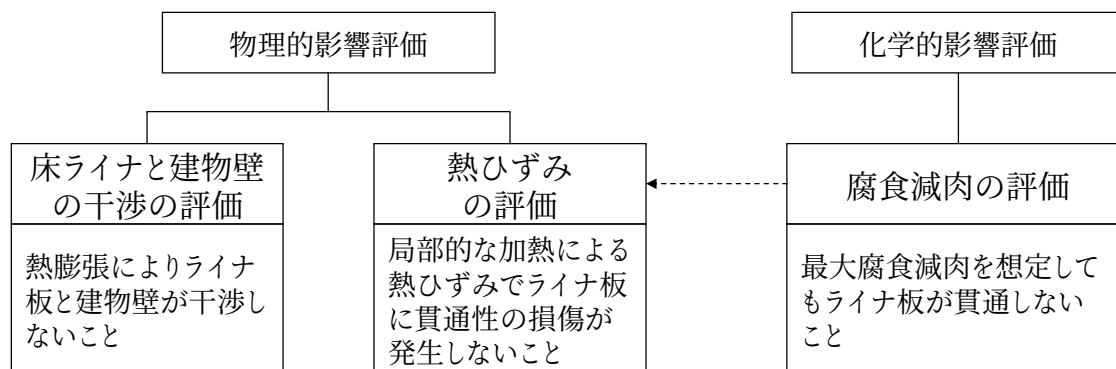
3. 床ライナの健全性評価

*：設計及び工事の方法の認可

床ライナの健全性評価項目

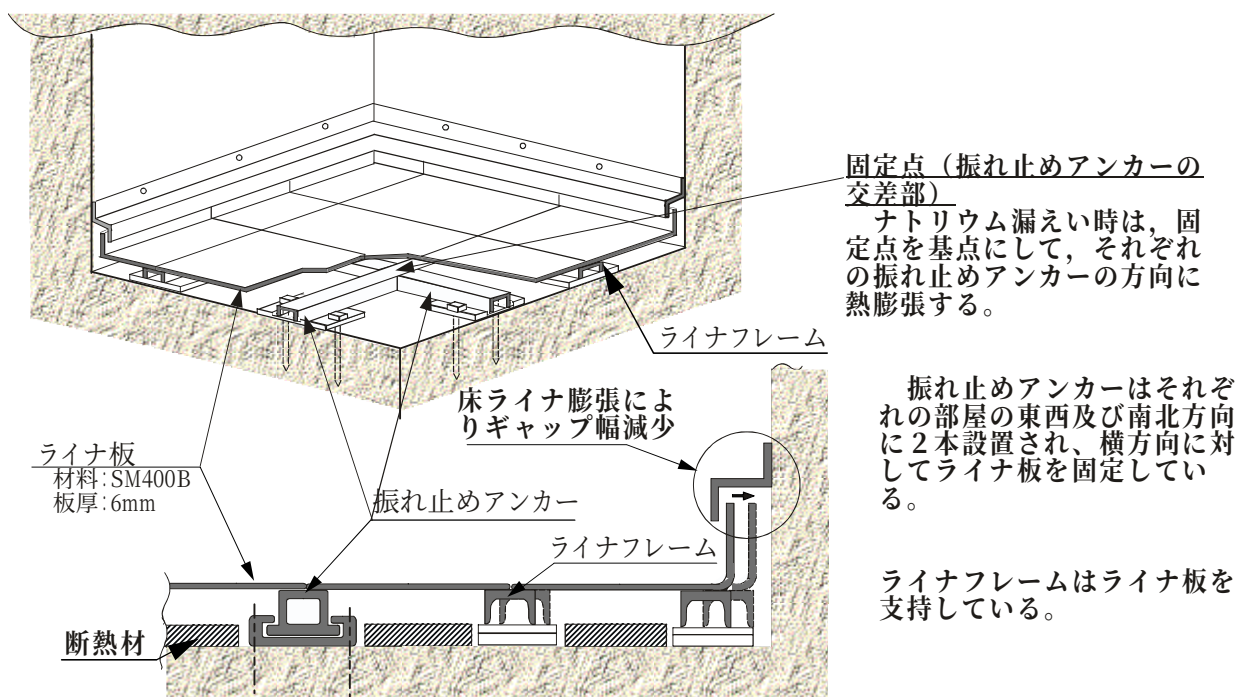
国の技術基準

原子炉施設がナトリウムの漏えいによる物理的又は化学的影響（ナトリウム及びナトリウム化合物が関与する腐食が構造物及び機器に及ぼす影響を含む。）を受けることにより、原子炉施設の安全に支障が生じるおそれがある場合には、その影響を抑制するための適切な措置を講じなければならない

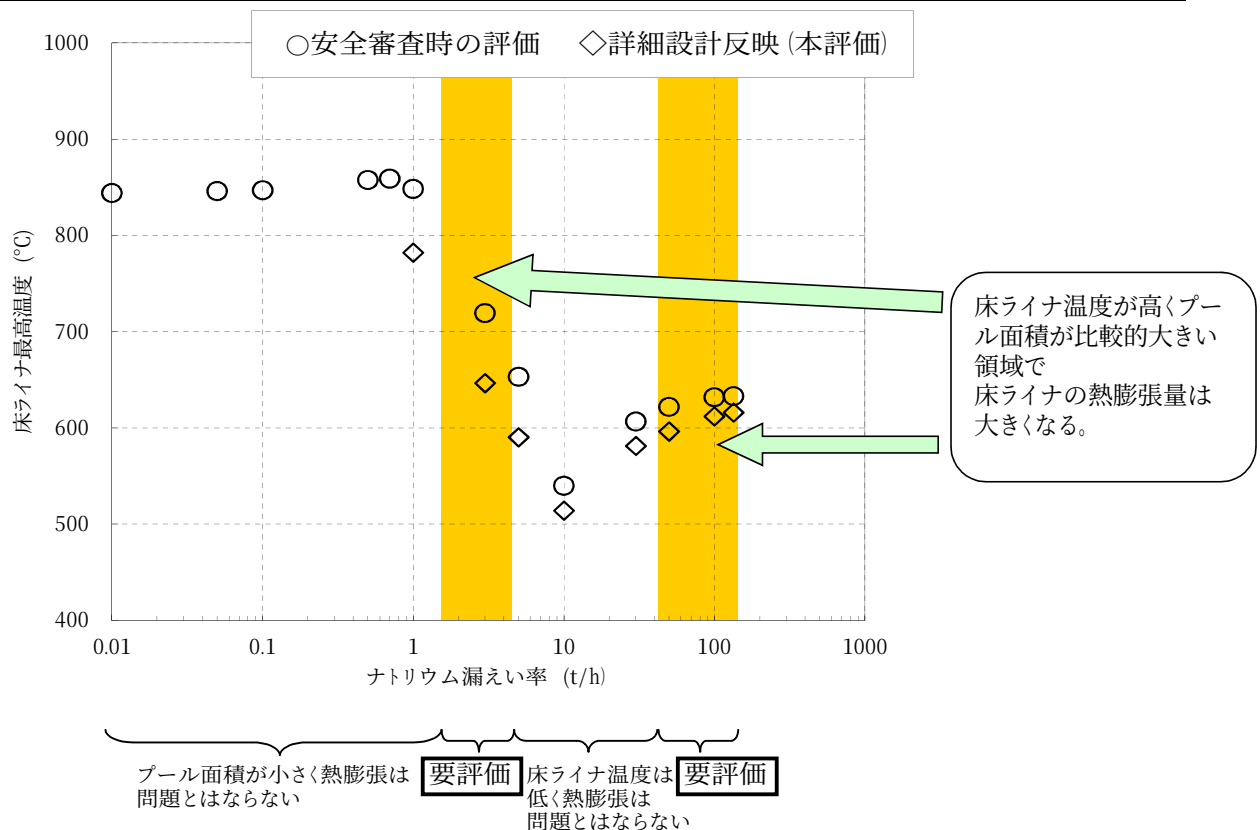


2次系床ライナの構造

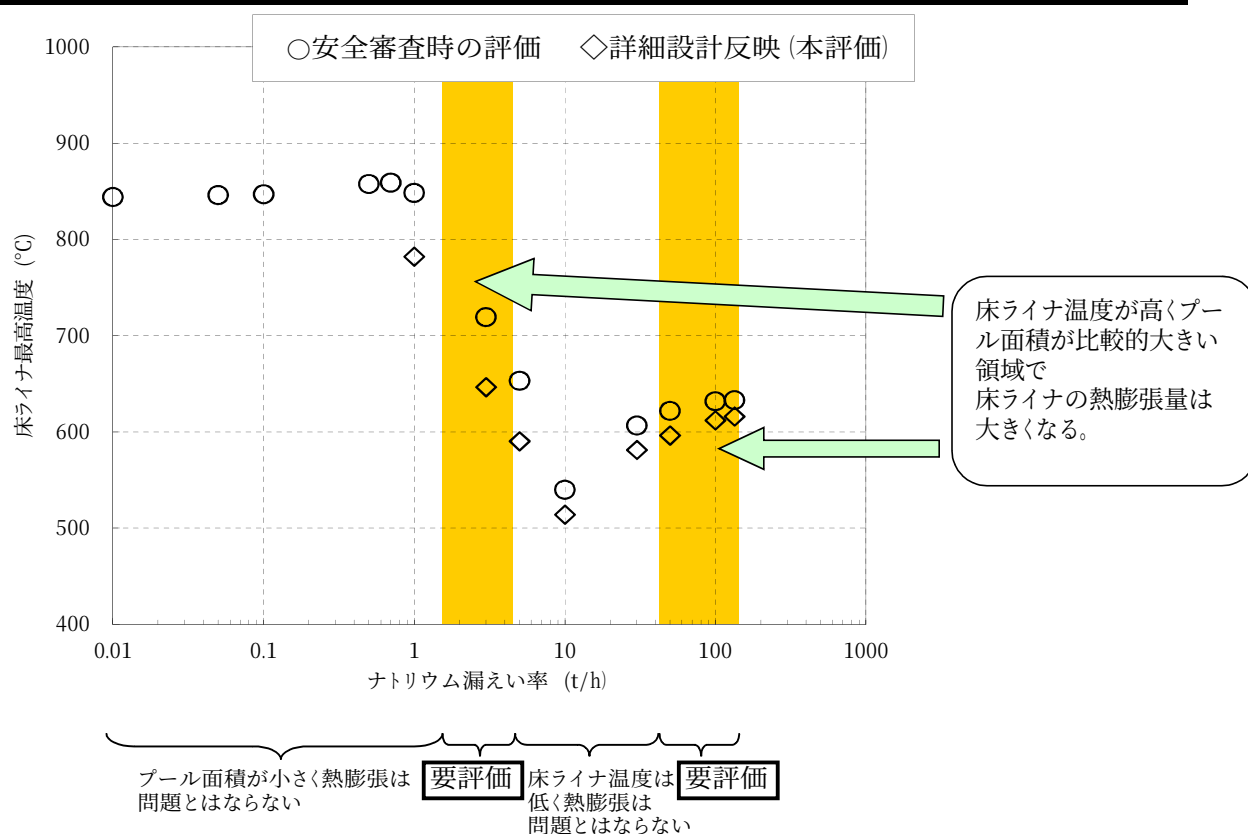
干渉の評価



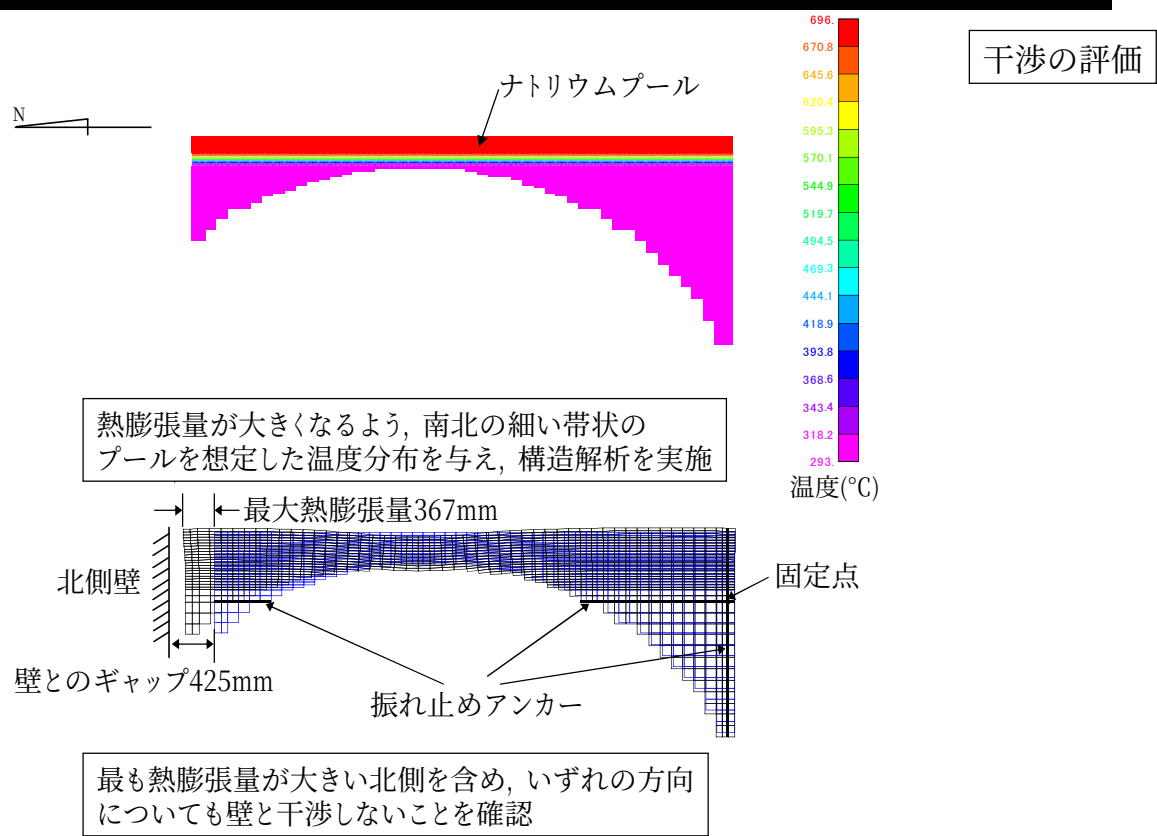
燃焼解析による床ライナの温度評価 (配管室)



燃焼解析による床ライナの温度評価 (配管室)



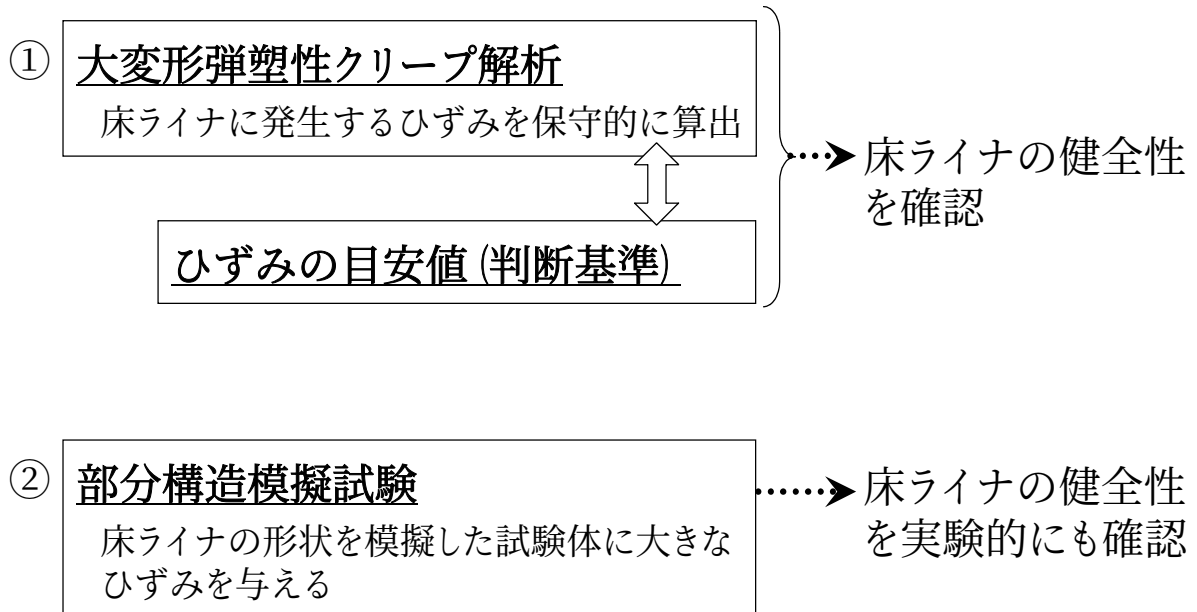
弾塑性解析による中小規模漏えい時の熱膨張量評価 (A-442)



ライナ板の変形概念とひずみ集中箇所

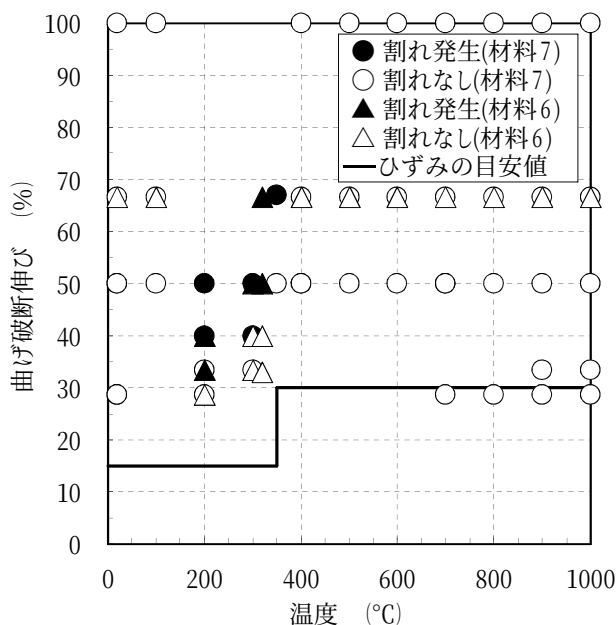
熱ひずみの評価

熱ひずみ評価の流れ

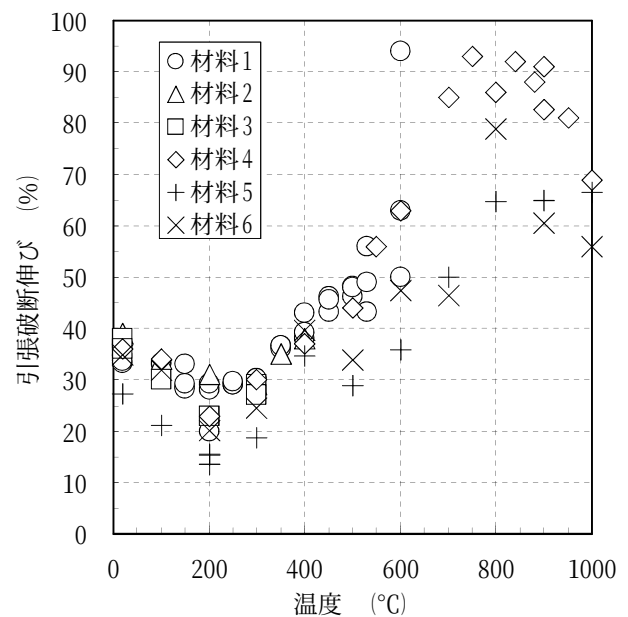


ひずみの目安値

⇒ 15% (室温 ≤ 床ライナ温度 ≤ 350℃)
⇒ 30% (350℃ < 床ライナ温度 ≤ 1000℃)

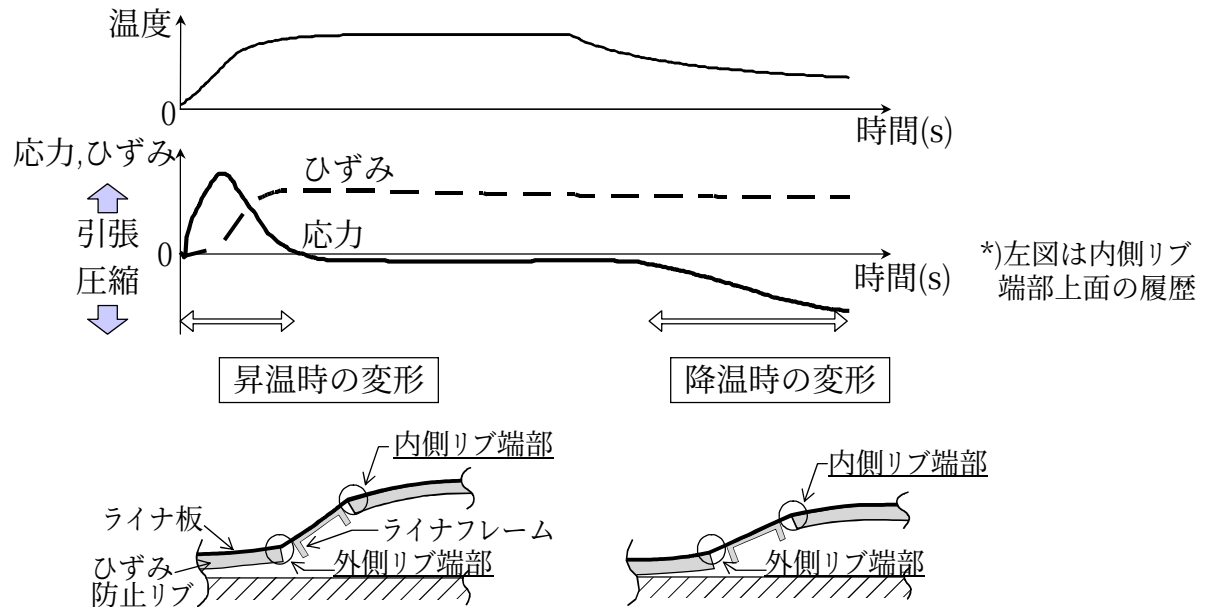


曲げ破断伸びとひずみの目安値



引張破断伸び

- ✓ ひずみ集中箇所の応力、ひずみの履歴は下記ようになる。
- ✓ 評価すべき期間は昇温時である。



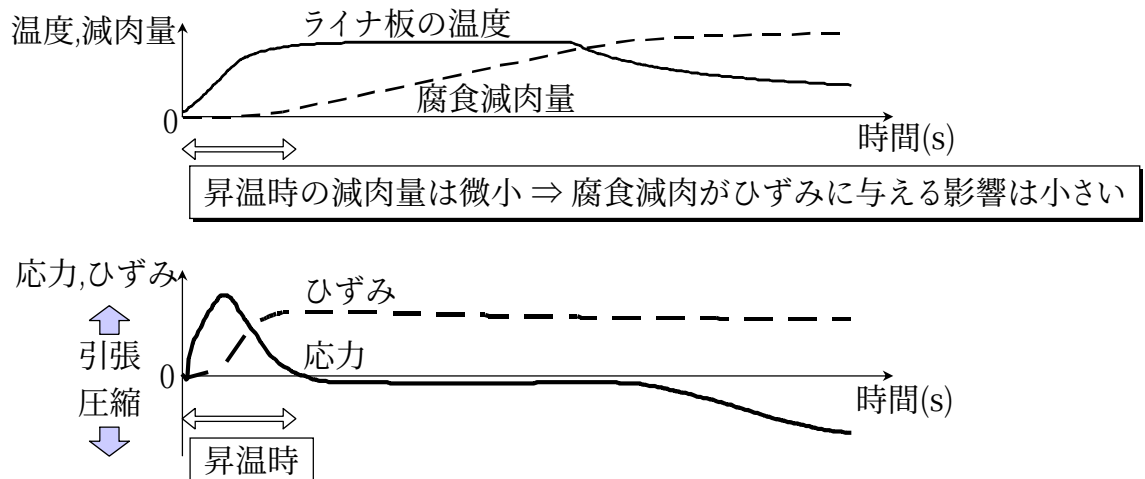
評価結果

- ✓ 床ライナに発生する熱ひずみ < ひずみの目安値
- ✓ 床ライナに貫通性の損傷は発生しない

ひずみの 評価位置	評価時の 床ライナ温度	ひずみの 目安値	減肉なし 板厚6mm	減肉なし 板厚7.2mm	減肉あり 初期板厚6mm
内側リブ 端部上面	低温時 ($T \leq 350^{\circ}\text{C}$)	15%	6%	4%	6%
	高温時 ($350^{\circ}\text{C} < T$)	30%	24%	20%	23%

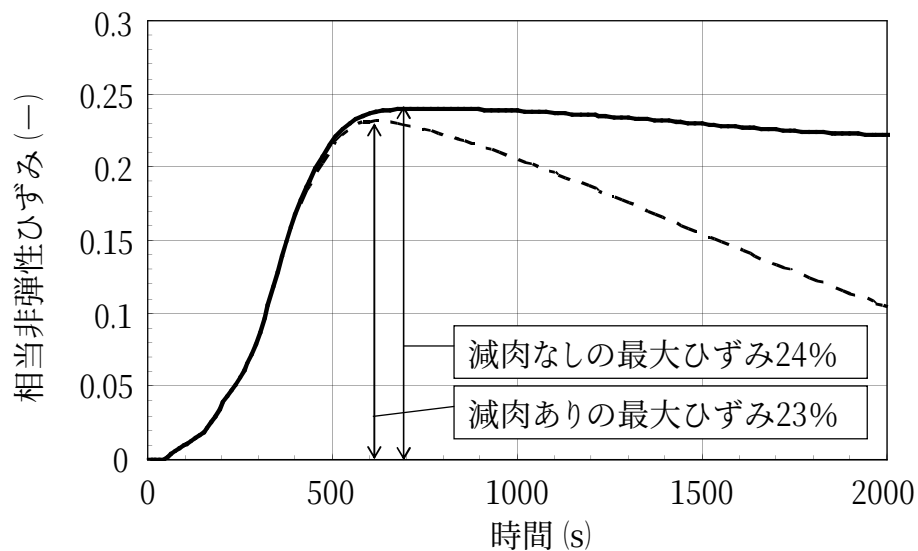
*減肉あり：ナトリウム化合物による腐食を考慮した評価

- ✓ ひずみ集中箇所の応力、ひずみの履歴は下記ようになる。
- ✓ 評価すべき期間は昇温時である。



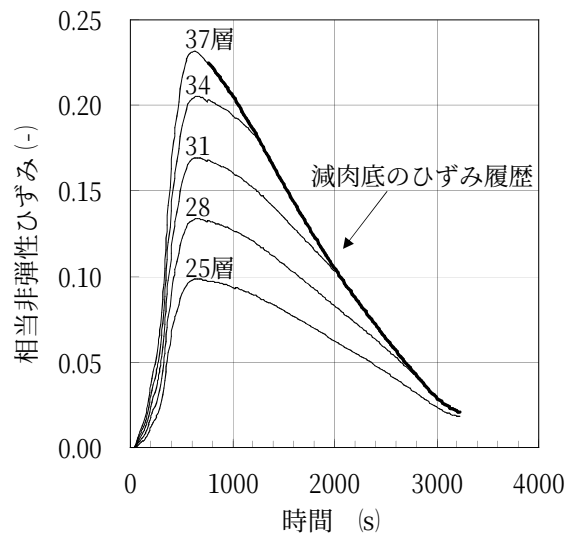
腐食減肉を考慮した解析結果

- ✓ 最大ひずみは、減肉なしと減肉ありでほぼ同じ値
(最大ひずみ時点における減肉量が約0.3mmと微小のため)



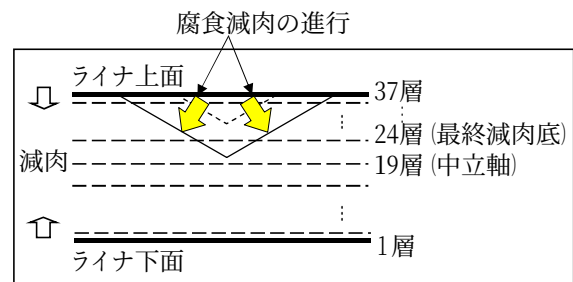
減肉モデル (減肉進行モデル)

熱ひずみの評価



*減肉進行モデルでは、ライナ板表面から順次腐食減肉が進行して表面が消失する。

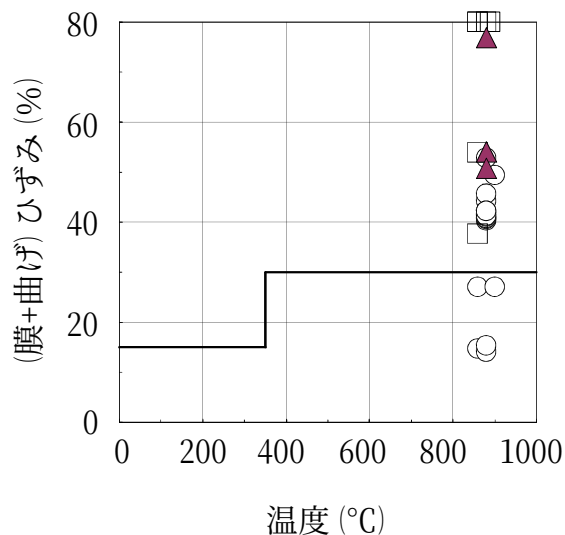
*各時点で最も表面に位置する積分点のひずみの履歴を結んだ左図の曲線が減肉底のひずみ履歴を表す。



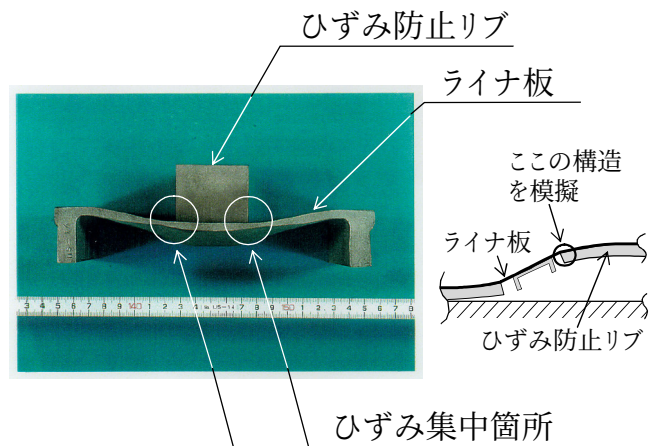
部分構造模擬試験(試験結果)

熱ひずみの評価

- ライナ板のき裂発生なし
- ライナ板のき裂発生なし (溶接金属の剥離あり)
- ▲ ライナ板に非貫通き裂
- 別途、材料試験により定めたひずみ目安値

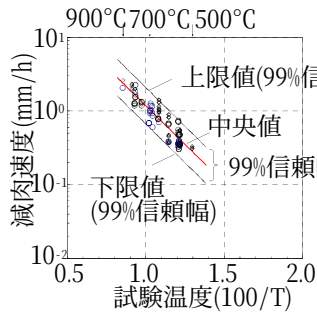


*解析による最大ひずみ (24%) 及びひずみの目安値 (30%) を上回るひずみを与えても、ライナ板を貫通する損傷は生じない



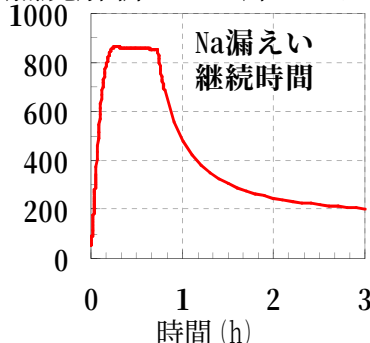
腐食減肉量の評価

実験から求めた溶融塩型腐食式



電気化学会で最も
大きな腐食速度を
与えたとされた

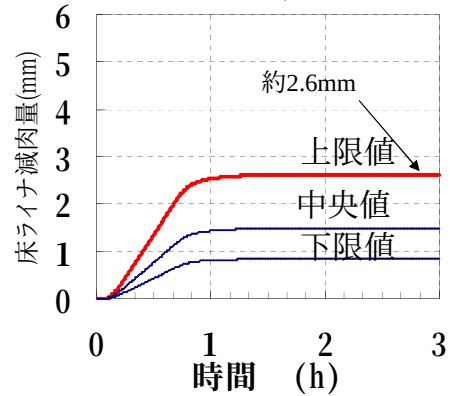
燃焼解析による床ライナ温度評価



燃焼解析コード
ASSCOPS
V2.1による評価

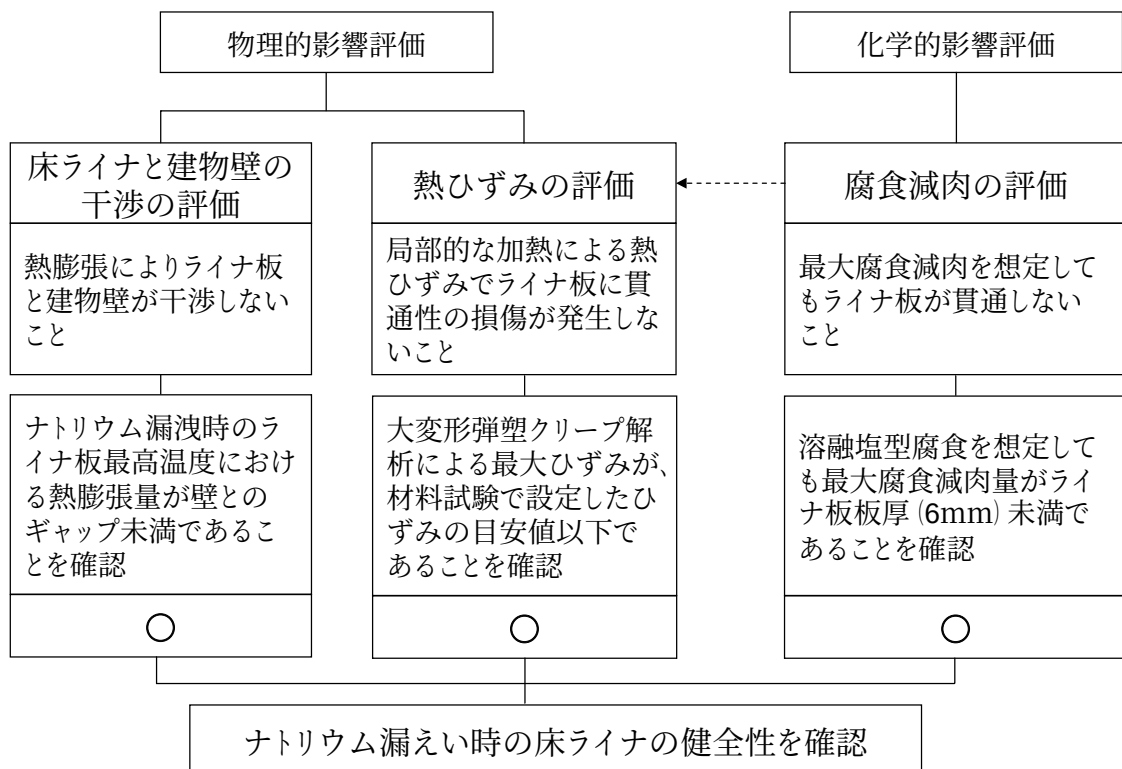
腐食減肉履歴 蒸発器室 (A-438)

腐食減肉履歴 蒸発器室(A-438)



床ライナの温度
履歴と溶融塩型
腐食式から算出

床ライナの健全性評価結果



結論

ナトリウム漏えい対策に係わる安全審査後の詳細設計段階で確認すべき項目について評価を行った。

- 壁等の断熱材及びヒートシンク材敷設の影響評価を行い、ナトリウム漏えい時において熱的影響の緩和が適切に図られることを確認した。
- ナトリウム漏えいによる物理的影響評価及び化学的影響評価を行い、床ライナの健全性が損なわれないことを確認した。