

大型高速炉燃料設計仕様に関する検討 (IV)

1993年3月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

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

大型高速炉燃料設計仕様に関する検討 (IV)

炉心・燃料技術検討グループ*

要　旨

本報告書は、「もんじゅ」以降の大型高速炉燃料設計仕様の選定に役立てるため、平成4年に実施した検討の結果をまとめたものであり、大型高速炉燃料の実用化の観点から、動燃事業団における燃料開発の状況、集合体変形に関するこれまでのR & Dの経緯、PNC 1520鋼被覆管の高温側データの取得状況について概要を述べたものである。

* 炉心・燃料技術検討グループ

林　秀行（大洗工学センター技術開発部プラント工学室）

鹿倉　栄（大洗工学センター燃料材料開発部燃料材料技術開発室）

上村勝一郎（東海事業所核燃料技術開発部プルトニウム燃料開発室）

中江　延男（東海事業所技術開発推進部炉心燃料設計室）

大谷　哲雄（東海事業所プルトニウム燃料工場　管理課）

永井　寛（本社動力炉技術開発部技術開発室）

March, 1993

Study on Fuel Design Specifications for Large Scale LMFBR (IV)

H. Hayashi*, S. Shikakura**, H. Nagai***,

N. Nakae**** and K. Kamimura***** and T. Ohtani*****

abstract

This report summarizes the results of the study on fuel design specifications for a large scale LMFBR in the fiscal year 1992.

The items contained in the report are as follows;

- (1) Present status of the fuel development in PNC
- (2) R&Ds on the deformation of fuel subassemblies in PNC
- (3) Sufficiency of the strength data of PNC1520-steel in high temperature region

* Plant Engineering Office, OEC,

** Fuel Analysis and Development Section, OEC,

*** Nuclear Fuel Cycle Development Division, Head Office,

**** Nuclear Fuel Design Section, Tokai Works,

***** Plutonium Fuel Technology Development Section, Tokai Works

***** Tokai Fuel Plant, Tokai Works

目 次

第1章 まえがき	1
第2章 動燃事業団における燃料関連研究開発の現状	2
2.1 中空ペレットの開発の現状	2
2.2 ODSフェライト鋼の開発の現状	5
2.3 ナトリウムボンド制御棒の開発の現状	11
第3章 炉心変形関連試験研究の経緯	17
3.1 「もんじゅ」のための炉心拘束機構試験研究について	17
3.2 「常陽」集合体の変形挙動	23
第4章 改良オーステナイト鋼の物性値について	32
4.1 改良オーステナイト鋼（PNC1520鋼）を700℃を超えて 使用する場合の評価式の適用性	32
4.2 改良オーステナイト鋼の物性値について	36

第1章 まえがき

「もんじゅ」以降の大型高速炉燃料設計仕様の選定に役立てるため、炉心燃料設計仕様に関して平成4年度に実施した検討結果を本資料にまとめた。

第2章では、中空ペレット、ODS鋼燃料被覆管およびナトリウムボンド制御棒の開発の現状について、第3章では、動燃事業団における炉心変形関連試験研究および「常陽」における集合体の変形挙動について、第4章においては、PNC1520鋼燃料被覆管の物性値に関し、高温側データの充足性について記した。

第2章 動燃事業団における燃料関連研究開発の現状

2.1 中空ペレットの開発の現状

2.1.1 動燃におけるMOX中空ペレット製造実績

動燃におけるMOX中空ペレット燃料の試作製造は、昭和40年代前半より行っている。昭和40年代においては、現製造法と異なり、粉末を成型した後予備焼結を行ったペレットに、精密旋盤を用いて両端側からドリルで穴空けを行う方法（ドリル法）をとっていた。この方法では、時間の手間がかかり、量産規模の製造法としては、現実的ではない。

昭和50年代に入り、工程の簡略化及び製造の容易性の観点から、成型工程の中空の圧粉体を作る方法の開発を行ってきた。成型法により中空ペレットを製造するに際しては、金型（特に中空コアロッド）の形状、材質を検討して座屈強度等の改良を実施してきた。この方法での製造は現在も続いている、各種の照射燃料の製造に用いられている。

現在までのMOX中空ペレット製造は、照射燃料が主で、特にFBR仕様の燃料では、計装線を入れるために中空ペレット（中空径約1.9mm）を製造したものである。

表2.1.1にこれまでに製造したMOXペレットの概略仕様について示す。

表2.1.1 中空ペレットの製造実績

キャンペーン	直径 (mm)	中空径 (mm)	高さ (mm)	密度 (%TD)
PBR常陽照射				
INTA-1	5.40	1.9	8.0	85
INTA-2	6.48	1.9	9.0	95
	6.48	1.9	9.0	92
ATR HALDEN照射				
I FA-514	10.54	1.85	10.0	95
	10.54	3.5	10.0	95
-529	10.66	1.85	10.0	95
-554/555	12.4	2.0	13.0	95
	12.4	3.5	13.0	95
Puサーマル照射				
PWR	8.19	1.8	13.5	95
BWR	10.31	3.6	10.3	95

2.1.2 開発課題

これまでのFBR用中空ペレットの製造は、照射試験を目的とした小規模なもの（数十～数百個程度／ロット）であり、製造歩留りや量産（数万個／日）を考慮した製造は、実施していない。これまでの製造経験からFBR用中空ペレットの量産製造上の課題は大きくは次の3点にあると考えられる。

(1) 成型（装置）に関する課題

- ・中空コアロッドの破損防止及び耐久性

FBR用中空ペレットの製造に用いられる、中空コアロッドの径は～2mmと細いため、成型時の高応力により、中空コアロッドの破損が生じる場合がある。従ってグローブボックス内での金型交換頻度をできる限り少なくし、コアロッドの変形等による不良品の発生を防止し、ペレットの量産化を図るために、耐久性があり強度の強い中空コアロッドの開発が今後の課題となる。

(2) 充填粉末の流動性に関する課題

- ・中空ペレットの量産化を図る上では、ダイス孔に粉末を均一に充填するために、適切なバインダを選定し、造粒粉の性状の最適化を図る必要がある。

(3) ペレット検査の観点から

- ・中空ペレットの密度を自動的に測定する装置の開発が必要となる。このためには、現在実証されている中実ペレットの密度測定装置に、ペレット内径を測る機構を組み込む必要がある。

2.1.3 開発課題に対する取組み

前述の開発課題に対しての技術開発の取組みは、既に始めているが、図2.1.1に示すような開発ステップで進め、量産製造に対するチェック・アンド・レビューに進む予定である。

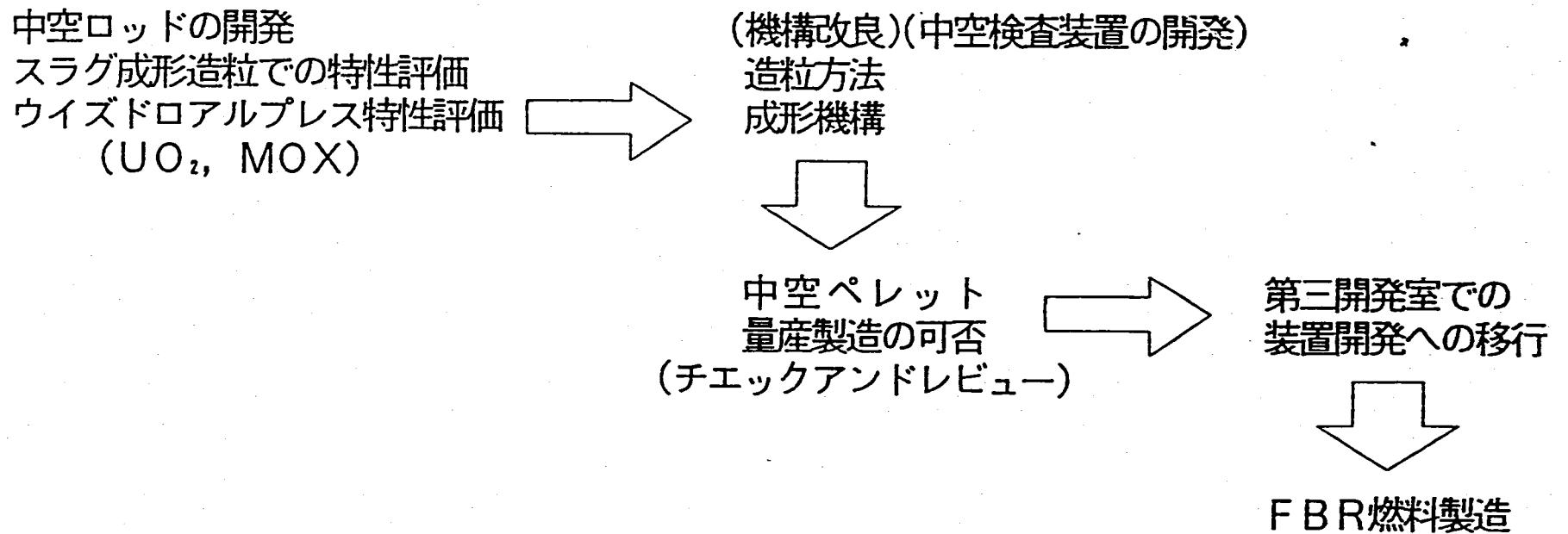


図 2.1.1 中空ペレット製造技術開発

2.2 ODS フェライト鋼の開発の現状

2.2.1 概 要

酸化物分散強化型(ODS)フェライト鋼は、優れた耐スエーリング性と酸化物分散強化による高いクリープ強度が期待できるため、動燃事業団では長寿命FBR炉心材料の本命として位置づけ、積極的な開発を進めてきた。動燃事業団におけるODSフェライト鋼の開発は1985年に着手し、これまで合金設計・製造技術開発を行ない国産ODS鋼被覆管の試作を実施するまでに至っている。

ここでは、これまでの開発経緯と現状、及び今後の計画について報告する。

2.2.2 開発経緯と現状

図2.2.1にODSフェライト鋼の開発スケジュールを示す。ODSフェライト鋼の開発はメーカー(神戸製鋼、住友金属)への委託研究の形で行ない、開発項目を3段階に分類し効率的な研究開発を進めている。これまで、基本調査・基本技術開発を実施し、今後は実用化移行技術開発のステップに進んでいく予定である。各ステップでの開発内容は以下のとおりである。

(1) 合金設計・被覆管試作

(i) 基本調査(市販材の評価と合金設計)

市販ODS鋼(MA957: INCOP社製)素材を購入し、温間加工技術の導入により、被覆管($7.5\phi \times 0.4t\text{mm}$)の試作を行なった。しかし、試作被覆管の内圧クリープ強度は極端に低く、ODS鋼の実用化のために合金設計から動燃独自で開発を進めていく必要があると判断した。

そのため、フェライト鋼粉末と酸化物粒子を機械的に合金化するアトライタ装置(ID: 1 kg/Batch)を導入し、粉末混合特性評価を実施して、アトライタ運転条件(MA条件)の最適化を行なった。また、42鋼種に及ぶ合金を試作し、酸化物粒子の分散状態に与えるTi, Nb, V, Zr等の合金元素の影響を広範囲に調査した。

(ii) 基本技術開発Ⅰ: '88, '89(合金設計、国産被覆管の試作)

基本調査の結果を基に、大型のアトライタ装置(5D: 5 kg/Batch)を導入し、内圧クリープ強度の向上に主眼をおいた合金設計を実施した。その結果、内圧

クリープ強度の向上には、Ti添加による分散粒子の微細化が最も有効であることを見いだし、その他の成分についても最適化を図った。

これまでの開発成果に基づき被覆管の試作を行い、世界最高レベルの内圧クリープ強度を有する国産ODSフェライト鋼被覆管（0.04C-13Cr-3W-0.25Ti-0.5Y₂O₃）の試作に成功した。（図2.2.2）

しかし、被覆管の周方向のクリープ強度は長手方向の半分程度であり（強度異方性）、また加工性が従来材と比較し極端に劣るとともに周方向の延性・韌性の改善が新たな課題として明確にされた。

（iii）基本技術開発Ⅱ：'90～'93（現状開発レベル：被覆管製造技術開発）

前述した課題を解決するため、現在、被覆管製造技術開発に取り組んでいる。強度異方性の主原因は圧延方向に細長く伸びた結晶粒組織にあると考えられている。そのためマルテンサイト変態を導入し等軸粒化を図ることにより、クリープ強度としてはODSフェライト鋼より若干劣るものの異方性のないODSマルテンサイト鋼（0.18C-11Cr-1.5W-1Ni-0.5Ti-1Y₂O₃）を開発している。

（図2.2.2）。延性・韌性については熱間静水圧加圧法（HIP）、鍛造等の加工法を導入することにより改善を実施している。

また、大型振動ボールミル（30kg/Batch）を用いた試験を行ない、将来に向けた大量生産対応についても取り組んでいる。

一方、新しい材料創製手法であるMAおよびODSに関して基本的な特性メカニズムを究明するため、大洗工学センターに粉体制御実験室を整備し、基礎実験を行っている。

（2）溶接法開発

溶接法については、現在東海事業所において、PMW法（パルス磁気溶接法）及びPRW法（加圧抵抗溶接法）の開発を行なっている。両溶接法のチェック＆レビューを1994年度に実施し、照射試験用燃料ピンの製造に向け、今後溶接条件の最適化を行った後グローブボックス内に設置していく予定である。

（3）炉外評価

炉外評価としては、Cs、Te、Iによる模擬腐食試験、Na中浸漬試験及び電子線

照射試験（北大）を実施し、耐FCC I性、耐Na腐食性及び耐スエリング性を調査した。その結果、耐FCC I性については316鋼と同等かそれ以上、耐Na腐食性及び耐スエリング性についてはオーステナイト鋼よりも優れていることが判明している。

内圧クリープ強度特性については、昨年度から高温強度評価W/G（東北大、金材研、神戸製鋼、住友金属、動燃）において評価を実施している。

(4) 炉内評価

炉内評価としては照射による機械的特性の変化を把握するため「常陽」CMI Rにおいて、スエリング、バースト、衝撃試験片等の照射を実施している。

また、燃料ピンとしての成立性を評価するため、本年11月よりEBR-IIにおいて燃料ピン照射試験(TOP試験、RBCB試験)が開始される。

2.2.3 今後の予定

加工性に優れ高強度のODS鋼被覆管を実用化するため、基本技術開発の成果に基づき1994年以降は主として経済性・大量生産性を追及した製造技術開発(実用化移行技術開発)を5年計画で実施する予定である。

また、「常陽」において高精度の温度制御型材料照射装置(MARICO-2)を用いて炉内クリープ破断特性を評価する。同時に、東海において製造したODS燃料ピンを「常陽」で照射し(B型特燃)、燃料ピンとしての成立性を実証することにより、国産技術としてのODS鋼被覆管製造技術を確立する。

参考文献

- (1) 濱下ら、原子力学会 1989年秋の大会 H6
- (2) 井上ら、日本金属学会 1990年秋の大会 407
- (3) T. Okuda, S. Nomura, S. Shikakura, K. Asabe, S. Tanoue and M. Fujiwara : Proc. of TMS Powder Metallurgy, TMS Fall Meeting, P. 195, Oct. (1989)
- (4) S. Nomura, T. Okuda, S. Shikakura, M. Fujiwara and K. Asabe : Proc. of TMS Powder Metallurgy, TMS Fall Meeting, P. 203, Oct. (1989)
- (5) S. Ukai, M. Harada, S. Nomura, S. Shikakura and I. Shibahara : Proc. of

International Symposium on Material Chemistry in Nuclear Environment,
Material Chemistry '92, P.347, March(1992)

(6) S. Nomura, S. Shikakura, S. Ukai, I. Seshimo, M. Harada, I. Shibahara and
K. Katuragawa, International Conference on Fast Reactor and Related Fuel
Cycles, FR'91, Vol. 1, 7. 4-1/10, Oct. (1992)

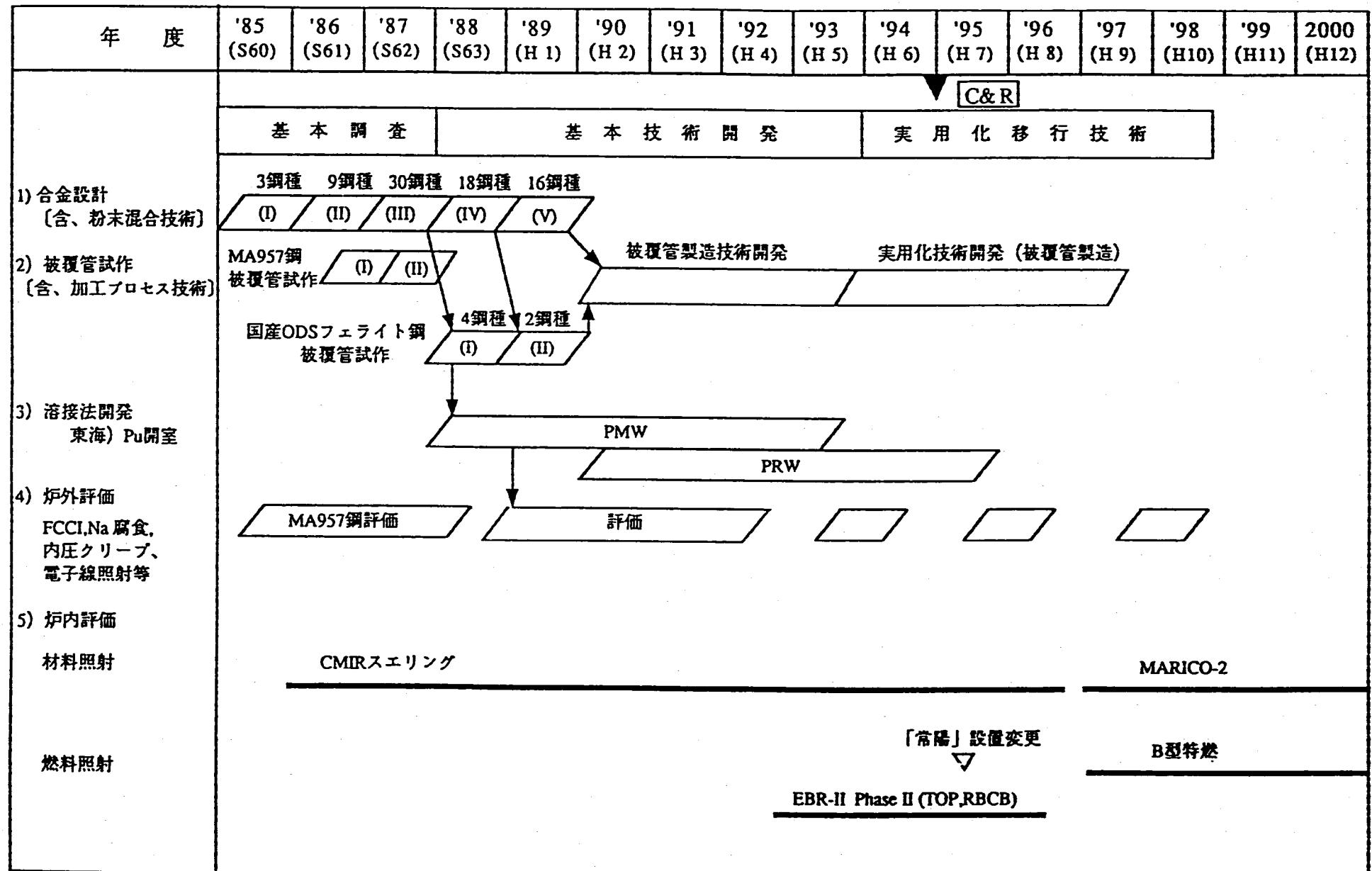


図2.2.1 ODSフェライト鋼の開発計画

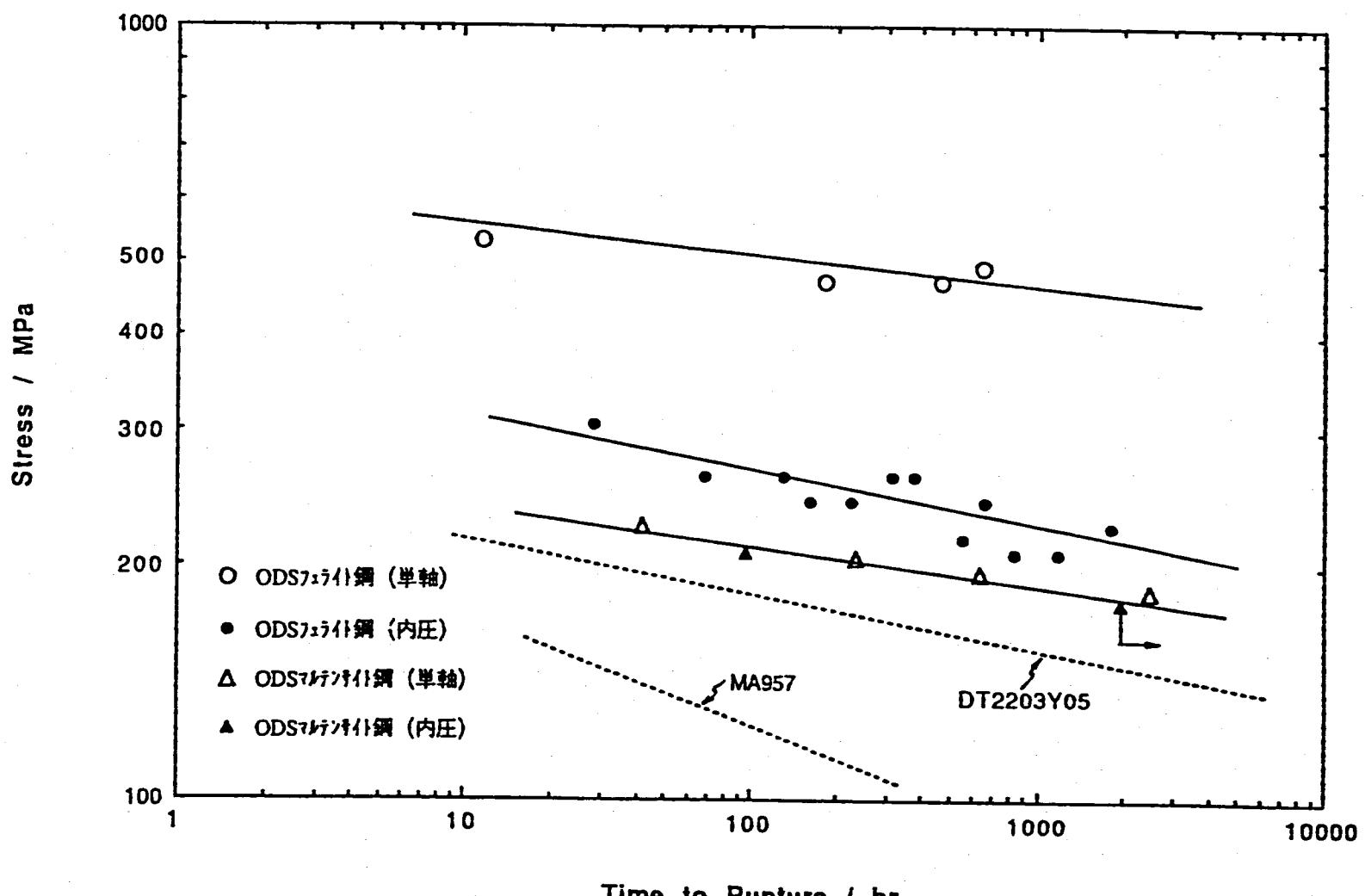


図2.2.2 ODS鋼のクリープ破断強度特性

2.3 ナトリウムボンド制御棒の開発の現状

2.3.1 はじめに

制御棒の長寿命化には、B₄Cペレットのスエリングによって生じる、B₄Cペレットと被覆管との機械的相互作用（ACMI）を緩和する必要がある。このため、両者のギャップを増大させることが考えられるが、ギャップの増大はギャップコンダクタンスの劣化につながり、B₄Cの温度が上昇し、溶融に至る可能性が生じる。これを回避するため、Heボンドに比べギャップの熱伝達を飛躍的に改善できるナトリウムボンド型の吸収ピンの採用が考えられる。

海外の高速炉においても、HeボンドとともにSuper Phenix等でナトリウムボンドの使用実績がありナトリウムボンドの成立性があると期待されるが、我が国ではこれまで実機使用実績がなく、データを十分でない。これまでに実施した炉外試験および照射試験の結果と現状を以下に述べる。

2.3.2 炉外試験

B₄Cペレット／被覆管材（コーティング材含む）／Na体系を模擬した両立性試験を実施した。試験は、キャップセルに試料を封入し、材質、温度、時間をパラメータとした熱履歴を与え、腐食特性評価等を行なった。

(1) B₄Cペレット

B₄Cペレットは650℃で20,000時間の加熱後においても割れ、粒化等は発生しなかった。ペレット直徑および重量の減少が見られ、温度が高くなるにしたがいその減少が顕著となる。これは、B₄Cがナトリウム中に徐々に溶出することを示すと考えられる。ペレット密度との関係では、低密度の方が変化が大きい傾向がある。これは開気孔による反応表面積の大きさが影響しているものと推測される。図2.3.1にB₄Cペレットの直徑変化の結果を示す。

実際の炉内での使用条件下では、B₄Cペレットにはクラックが発生するため、その影響を考慮しなければならないことに留意する必要がある。

(2) 被覆管材

オーステナイト系とフェライトマルテンサイト系では異なった反応の様子を示すが、ともに反応層、遷移層および未反応層が認められた。反応層では、B濃度の増

加、硬さの増加、等が生じている。反応層の厚さは、温度が高いほど、時間が長いほど大きくなる傾向にある。450℃では反応は認められなかったが、550℃、650℃では反応層を形成した。図2.3.2に試料表面の金相写真を示す。

650℃で20,000時間後の反応層の厚さは、PNC316 (CW) > PNC1520 > PNC316 (ST) > PNC-FMSの順に大きかった。図2.3.3に反応層の測定結果を示す。両立性の観点からは、被覆管材料としてはフェライトマルテンサイト鋼の方がよいと考えられる。

(3) コーティング材

候補コーティング材として、Nb、Ti、Cr、Niを選定し、650℃で10,000時間までの腐食評価試験を実施した。Niは、B、Cを浸透させ易くバリアとして劣っており、腐食防止に対してほとんど効果がなかった。

Ti、Nbはいずれも表面に10~20μm程度の変質層の形成が認められ、若干Bを拡散させ易いことがわかった。

Crコーティング層は、硬さが低下している以外は形態的にも、組織的にも全く変化を起こさなかった。また、母材との接合面も良好であり、コーティング材として優れていることが確認された。図2.3.2に試料表面の金相写真を示す。

2.3.3 照射試験

(1) AMIR照射

「常陽」においては、吸収材料照射用リグ(AMIR)を用いた照射試験を実施している。Naボンド型試験試料の照射試験はAMIR-5およびAMIR-7リグを用いた照射試験を現在実施中である。

これらの試験は以下のパラメータを設定した。

- ・被覆管温度：500, 570, 650℃
- ・被覆管コーティング：Cr, Nb, Ti
- ・ペレット密度：85, 95%TD
- ・初期ギャップ：355, 555μm

AMIR-5は照射を終了し(燃焼度約 40×10^{20} cap/cc)，一部の試料の照射後試験を本年から開始する計画である。

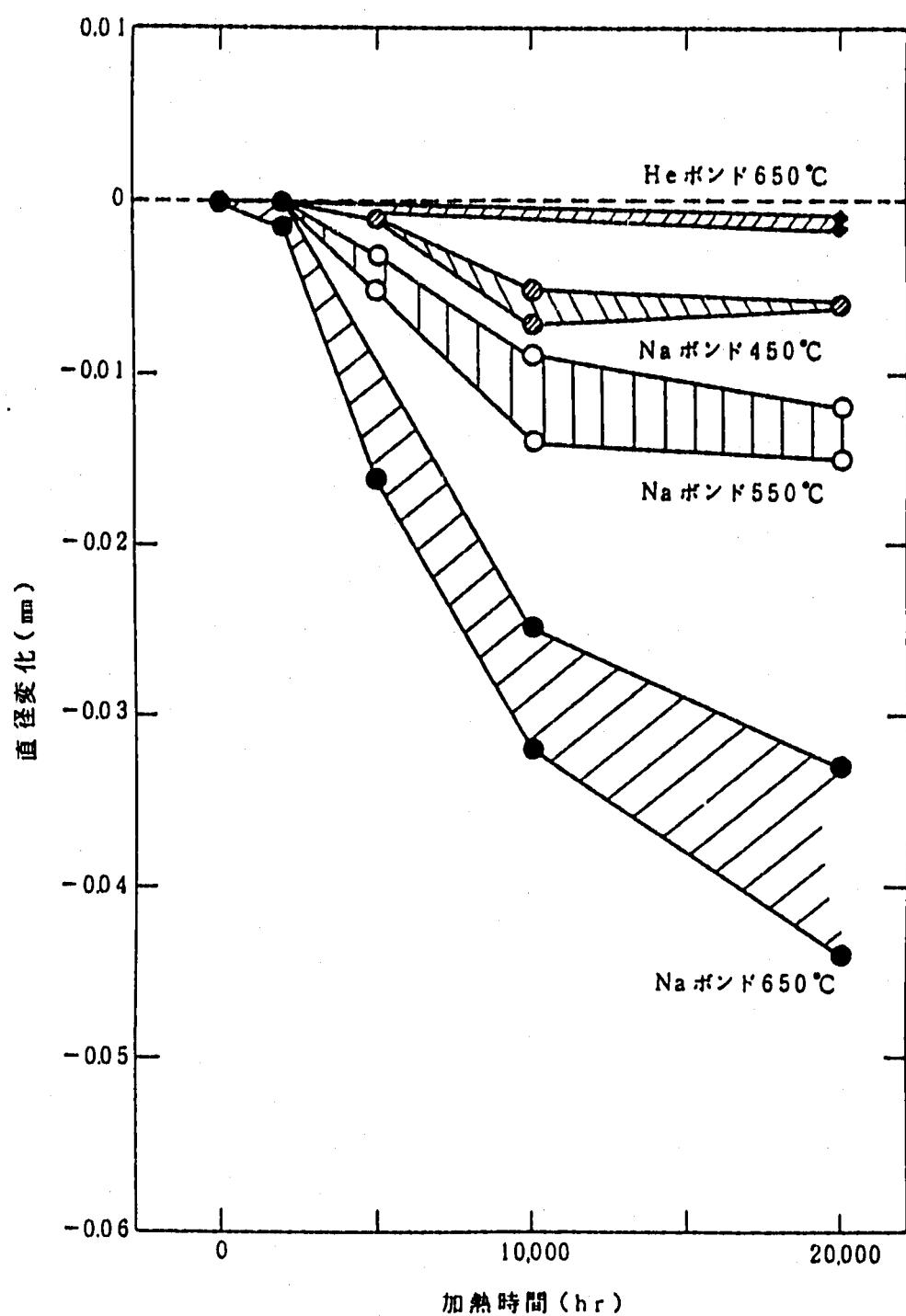
残りの試料はAMIR-7に再装荷して照射を継続する予定である。照射は本年

末に開始され、平成6年に燃焼度約 70×10^{20} cap/ccに達して終了し、その後照射後試験を実施する予定である。

さらに高燃焼度までの照射試験を平成5年度から実施するため、試験の内容を検討している。

(2) 「常陽」制御棒

「常陽」の制御棒はHeボンド、ペント型吸収ピンであるが、長寿命化を図るため、AMIR照射試験の結果を踏まえて、Naボンド型に変更することを検討している。

図 2.3.1 B₄Cペレットの直径変化

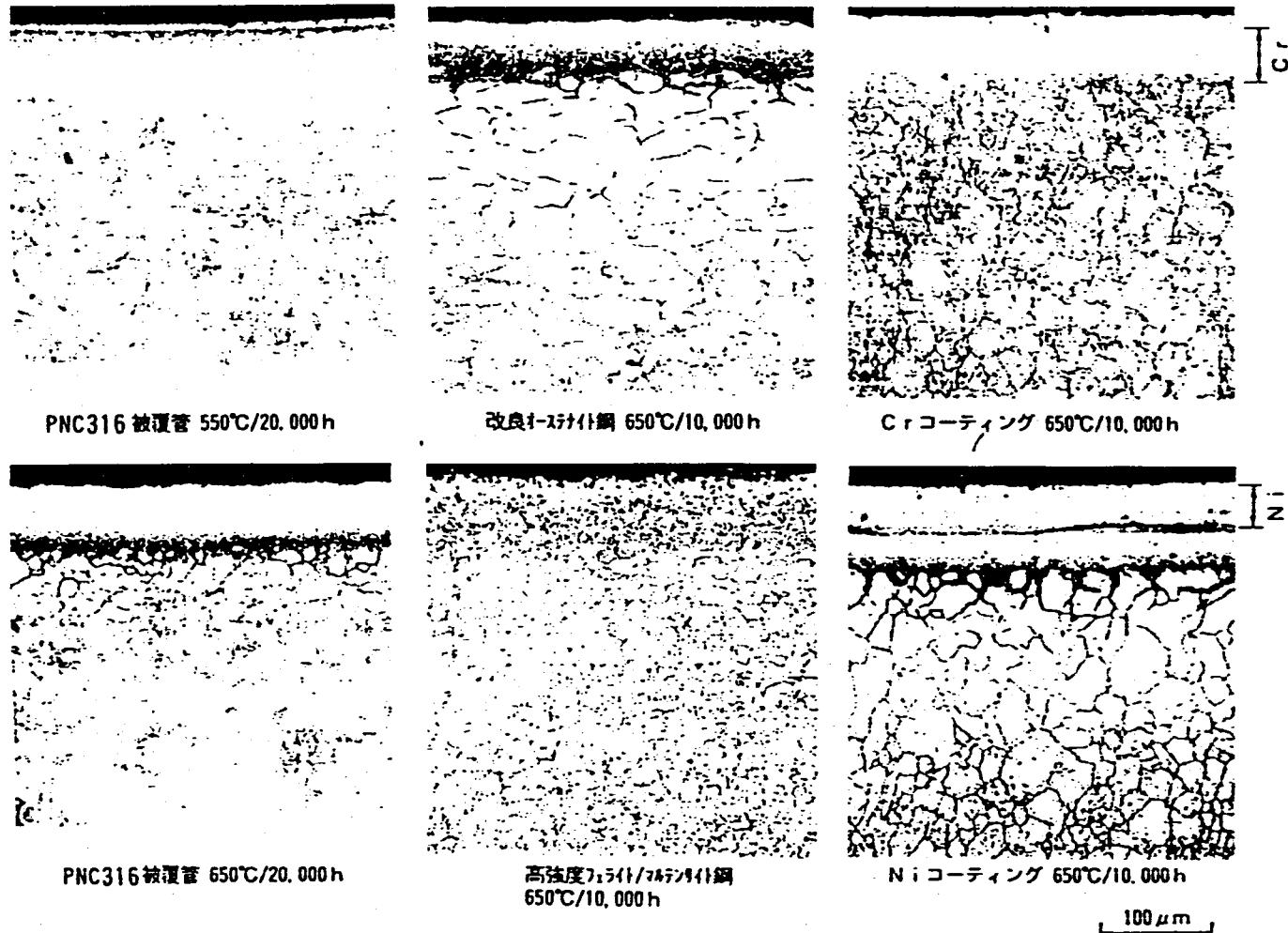


図 2.3.2 ナトリウムボンド制御棒の両立性試験後の表面近傍組織

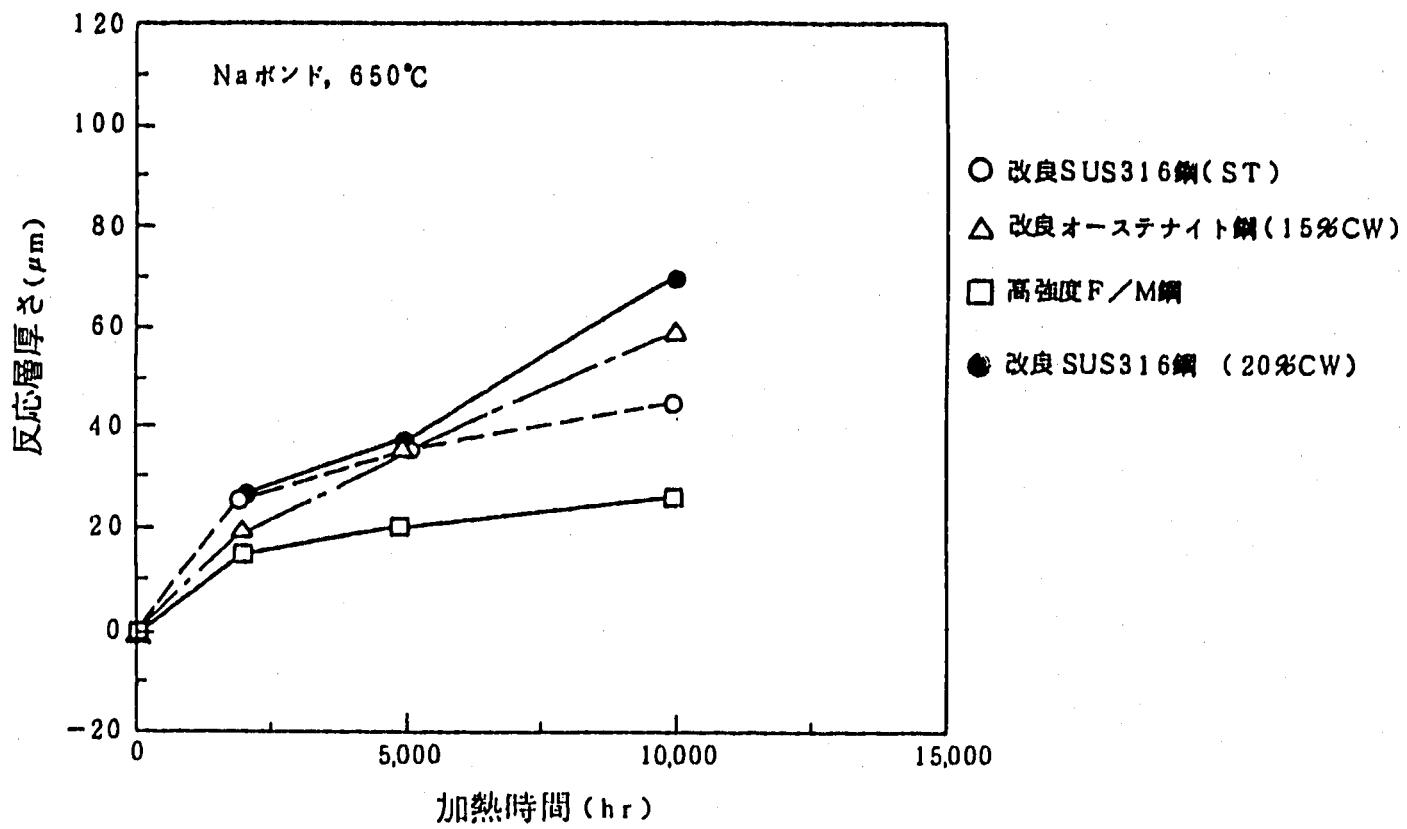


図 2.3.3 被覆管材料の反応層厚さ変化

第3章 炉心変形関連試験研究の経緯

3.1 「もんじゅ」のための炉心拘束機構試験研究について

3.1.1 研究目的、概要

「もんじゅ」炉心を対象に、当時検討が進められていた炉心拘束機構の開発のために、炉心拘束機構試験装置を用いて各種試験を実施し、炉心拘束機構の特性、集合体引抜力等を評価した。

本試験研究は、試験装置を1972年に作成し、1973年から1976年にかけて同装置を用いて各種試験を実施した。また、平行して炉心拘束機構の要素試験を行うとともに、1974年から1978年にかけて炉心変形解析コードの開発を実施した。

炉心拘束機構とは、オンパワー中は炉心構成要素を拘束し、オフパワーでは拘束を解除して集合体の引き抜きを容易にするために考えられた機構で、内部クランピング方式（制御棒、反射体のパッド部をスライドさせる方式）及び外部クランピング方式（炉心構成要素外側の拘束部を内外にスライドさせる方式）について検討が行われたが、結局実機炉心要素には採用されなかった。

3.1.2 研究経緯

(1) 炉心拘束機構試験

① 炉心拘束機構試験装置の製作 - 1972年度

同装置は、「もんじゅ」の実機サイズの炉心構成要素を用い、最大1/3セクター（120°）での実機を可能とする。また、縮小炉心での全セクター（360°）試験も可能である。

② 炉心拘束機構試験（第1次試験及び基礎試験） - 1973年度

（基礎試験）

炉心構成要素の曲げ特性試験（1体及び7体）及び力の伝達に影響を及ぼす摩擦力についての評価試験を行った。

（第1次試験）

炉心拘束機構試験装置を用いて、外部クランピング方式での力の伝達特性、集合体の変位量、変位の方向、集合体の引抜力等の各種特性を評価した。主なパラ

メータは以下のとおりである。

- ・外部荷重（外部クランピングの最大ストロークは100mm）
- ・パッド特性（数種類のパッドについて評価）
- ・湾曲管の配置

試験の概略図を図3.1.1、図3.1.2に示す。この試験の構成は以下の通りである。

- ・集合体模擬真直管：132本
- ・集合体模擬湾曲管：10本
- ・中性子遮蔽体模擬真直管：108本

湾曲管の曲げ量は、頂部変位量で25mmである。

（主な成果）

- ・真直管曲げ試験による基礎データの取得
- ・摩擦試験で3種のパッド面（モリコート面、清浄面、極圧潤滑油面）について試験。後2種については摩擦係数が大きく高荷重時にかじり、キズ等を発生。
- ・クランプ試験では、パッド当て部で炉心構成要素のセリ上がりが生じ、理想完全しまり状況と比べ、ストロークはかなり小さくなって中心部に伝達される。→クランピング機構の改良
- ・1／3セクター試験で全セクターの状況をある程度推測できるが、固定壁の影響を無視できない。
- ・パッド間隙が大きいと、ストロークが大きい場合パッドのはずれが生じる。

（パッド形状の改良で対応可能）

- ・中心近傍あるいは固定壁との間で力の相互干渉があるため、ストロークのわずかな変化で押付荷重が大きく変動する。
- ・中性子遮蔽体の剛性により、押付荷重に明確な差が出るが、パッド面の摩擦係数の違いでは押付荷重に大きな差はなかった。
- ・湾曲管を配置した場合、押付荷重は増加する。湾曲管効果による集合体の動きについては、もう少し湾曲管を多くしての試験に期待。

③ 炉心拘束機構湾曲集合体大気中総合試験 - 1976年度

1973年度、1974年度に引き続き、炉心拘束機構試験装置を用いての試験を実施した。本試験では、湾曲管を120体に増やし、それらをリング状配置あるいは一方向にまとめた集中配置として、炉心拘束試験、集合体引抜・挿入試験を行った。

(主な成果)

- ・同じ最大押込ストロークで真直管集合体のみの場合とほぼ同様の炉心拘束状態が得られる。しかし、拘束に必要な荷重は増大する。
- ・炉心の辺押しと角押しによる炉心拘束状況は真直管集合体の場合と湾曲管集合体を多数入れた場合とで大差はないが、角押しの場合摩擦係数の影響が顕著に現れる。
- ・パッド当ての形状を改善することによって、1方向への荷重集中を低減できる。
- ・引抜力、挿入力に対するパッド部干渉力の効果が大きい。湾曲管集合体の場合には拘束状態で湾曲部が上部パッド部を通過するとき大きな引抜力、挿入力が生じる。

(2) 炉心拘束機構要素試験

① 内部炉心拘束機構単体試験 (1973年度)

- ・内部クランピング機構の設計、試作
- ・解析結果を反映して荷重負荷試験を行い、内部クランピング機構（クサビ方式）の耐久性を評価

② 内部炉心拘束機構ナトリウム中試験 (1976年度)

- ・以下の条件で内部炉心拘束機構のナトリウム中試験
 - 荷重負荷保持温度：540℃
 - 機構作動温度：220℃
 - 負荷荷重：50～200kg
 - 繰り返し数：30回（1回の保持時間200時間）
- ・特に問題となるような現象は出なかった。

③ 外部炉心拘束機構水中試験（1976年度）

- ・外部クランピング機構用流体圧シリンダモデルによ常温水中での流体特性試験を実施
- ・シリンダ内の漏洩流量の測定、ピストン作動試験を実施

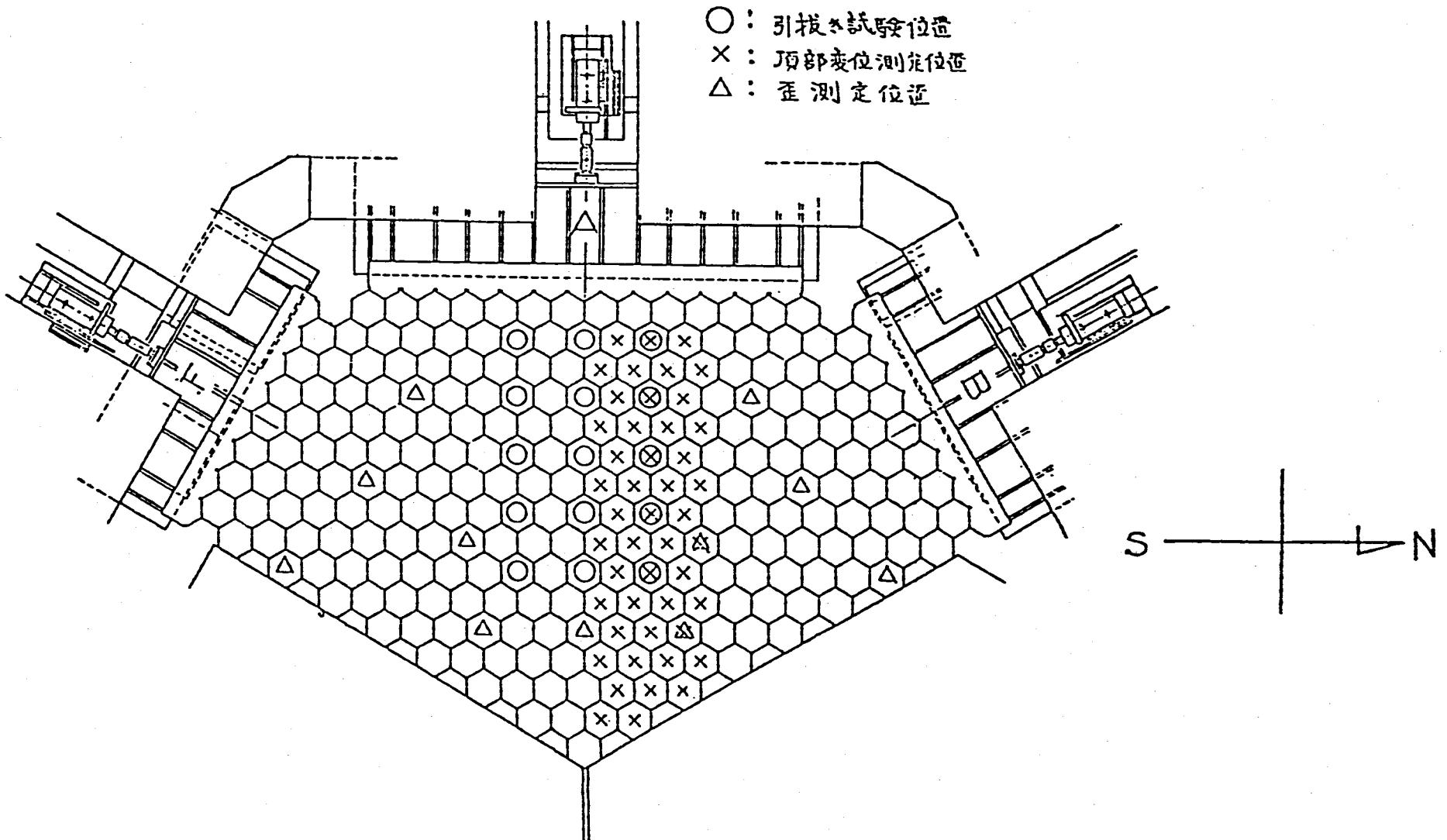


図3.1.1 120° セクタ炉心配置図

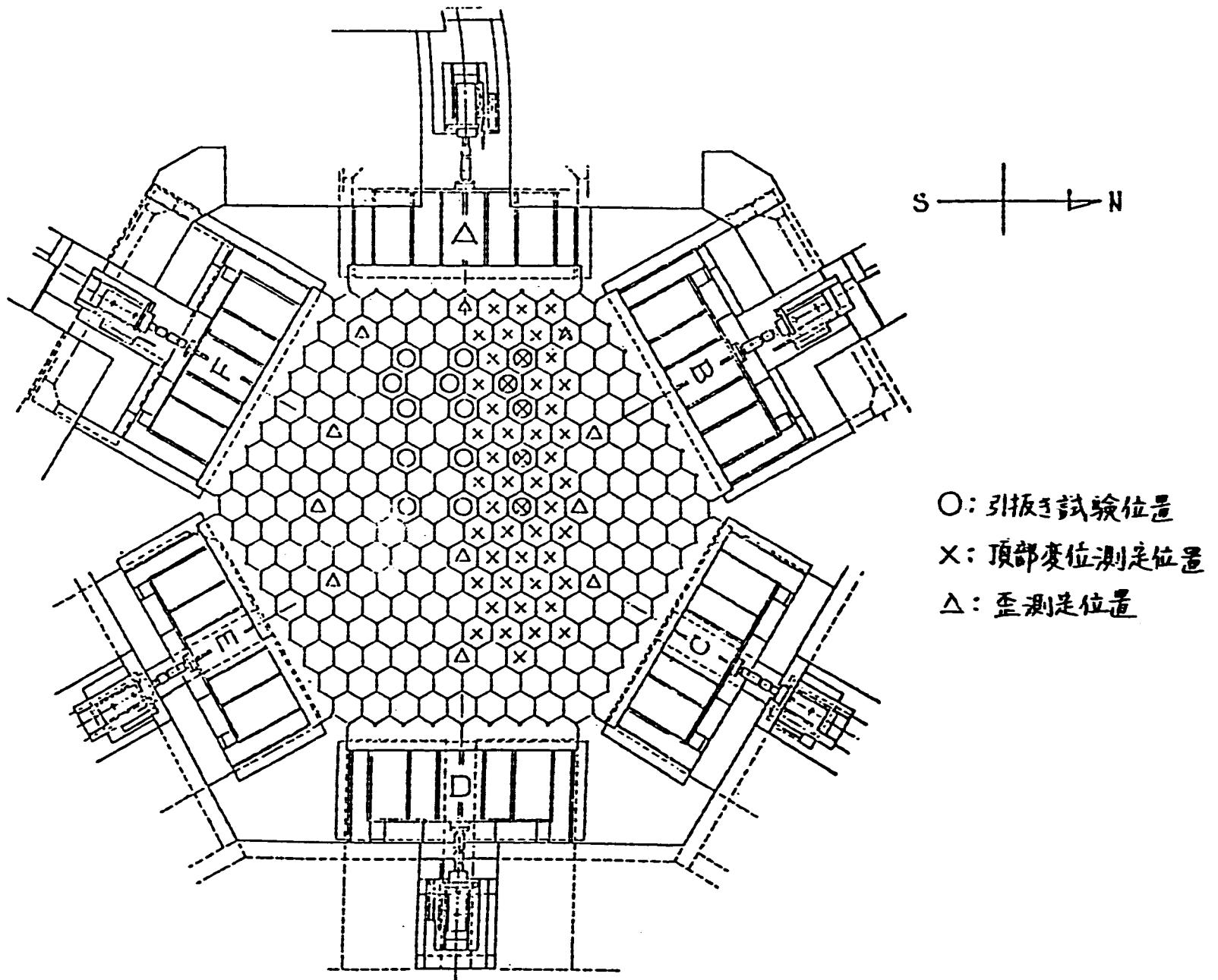


図 3.1.2 縮小360° 炉心配置図

3.2 「常陽」集合体の変形挙動

3.2.1 はじめに

高速炉炉心構成要素は、炉内における中性子束勾配および温度勾配に伴うラッパ管対面間のスエリング差および熱膨張により湾曲が生じる。集合体は炉内においては、炉心拘束機構により拘束されているため、湾曲が生じると集合体間の相互干渉力が発生し、燃料交換時の引き抜き、挿入特性に大きな影響を与える。このため、燃料集合体の湾曲挙動は燃料設計上の主要な評価項目の一つである。

また、集合体湾曲はATWS時等で正の反応度を打ち消す負のフィードバックの反応度となることから安全評価上からも着目されている。

しかし、実際の炉心湾曲挙動データについて検討した例は少ない。「常陽」炉心燃料の照射後試験は、これまで継続して実施されており、燃焼度、炉内装荷位置、等をパラメータにしてデータを取得してきた。また、反射体についても同様に照射後試験データが蓄積されてきている。これらの実機集合体の湾曲挙動に関する照射後試験結果を整理し、集合体湾曲挙動の評価を行なった。

FMFにおける非破壊照射後試験では照射済炉心構成要素の集合体寸法測定試験を実施し、曲がり量（頂部変位量）の測定値を得ている。集合体の照射後残留曲がり量測定結果を炉内装荷位置との関係で整理して図3.2.1に示す。炉心半径方向の中性子束の勾配、温度分布の勾配に大きくなることを反映して外側に行くほど残留曲がり量が増加する傾向にあることがわかる。

今回の「常陽」炉心集合体の変形挙動解析のフローを図3.2.2に示す。

3.2.2 炉内摩擦力の検討

集合体の照射後残留曲がり量測定結果と、「常陽」での燃料交換時の引き抜き力測定結果との両者の関係を調べることにより、集合体間の摩擦力を推定した。

頂部変位と引き抜き力の関係を図3.2.3に示す。燃料集合体と反射体を区別して図に表示しているが、いずれも頂部変位量に引き抜き力が比例しており、同様の傾向にある。このことから燃料交換時引き抜き力は、集合体の残留湾曲による相互作用に起因する接触力によって生じると判断する。

本挙動にたいし、相互作用が比較的単純な内側反射体に対し接触力を評価し、炉内

の摩擦係数を見積った。解析の結果は摩擦係数として約0.3の値を得た。この値は、炉外試験によるパッド部摩擦係数の測定値である0.3~0.4と一致している。結果を図3.2.4に示す。

現状の設計では摩擦係数として炉外試験の結果を使用しているが、このデータによりその妥当性が確認された。

3.2.3 集合体残留湾曲量の評価

燃料集合体および反射体について、「常陽」の照射条件を用いて湾曲解析を行ない照射後試験データと比較検討した。

炉心湾曲解析コードBEACONを用いて熱湾曲とスエリング湾曲拘束化での照射クリープ変形を解析し、PIE残留湾曲量と比較することにより、炉内における集合体相互干渉挙動を評価した。

解析条件として、集合体ラッパ管温度分布、中性子束分布は「常陽」の核熱評価結果を用い、ラッパ管の物性値についてはラッパ管の膨れ量測定データから求めた評価式を用いた。

反射体の挙動解析

反射体の解析対象として、炉心内配置が対象であり、炉内滞在時間の異なる3体を選択した。炉内装荷位置と残留曲がりの方向を図3.2.5に示す。解析結果と照射後データとの比較を図3.2.6に示すが、ノミナルの照射条件、物性値では解析結果は曲がり方向が照射後データと逆になり、残留曲がりの挙動の説明できない。解析条件をパラメータに比較検討した結果では、照射クリープの値を1/10にすると比較的良く一致する結果を得た。また、ラッパ管の周方向温度差を小さくすることによっても、照射とともに曲がりが増加する傾向を表すことができることがわかった。

燃料集合体の挙動解析

燃料集合体は、曲がり量の絶対値が小さいため、解析対象としては最大曲がり量を示した1体を選択した。図3.2.5に炉内装荷位置と残留曲がりの方向を示す。反射体と同様の方法で解析を実施した結果を図3.2.7に示す。図に示したように、照射クリープの値を1/10にすると、反射体とは逆に、曲がりの方向は表せない結果となった。しかし、制御棒方向への温度勾配を大きくすることで、照射後のデータと比較的良く

合う結果を得る可能性がある。

まとめ

集合体の残留曲がりは、ラッパ管温度および照射クリープに対する感度が大きく、特に反射体においては Δ 発熱の大きい出力評価、流量の不確かさから、ラッパ管温度分布評価に大きな不確かさ（対面間温度差で数十度）があるため精度良く説明することができなかった。このため、反射体のような温度勾配が大きい領域での温度評価精度向上が湾曲評価の精度向上に必要であることがわかった。

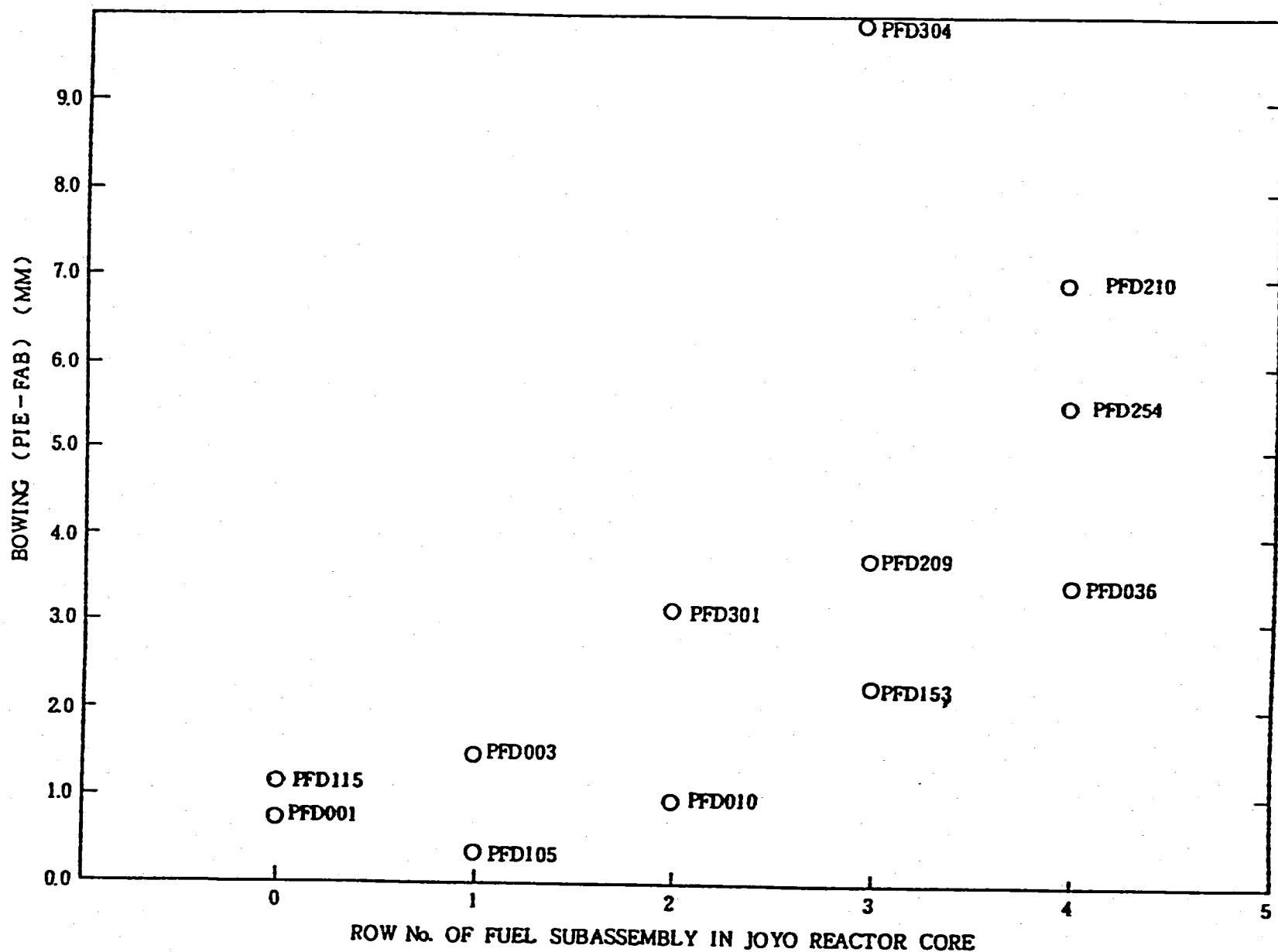


図3.2.1 集合体曲がり量と炉内装荷位置の関係

- ① 引抜力と炉内まさつ挙動の検討
- ② 集合体残留湾曲量の検討

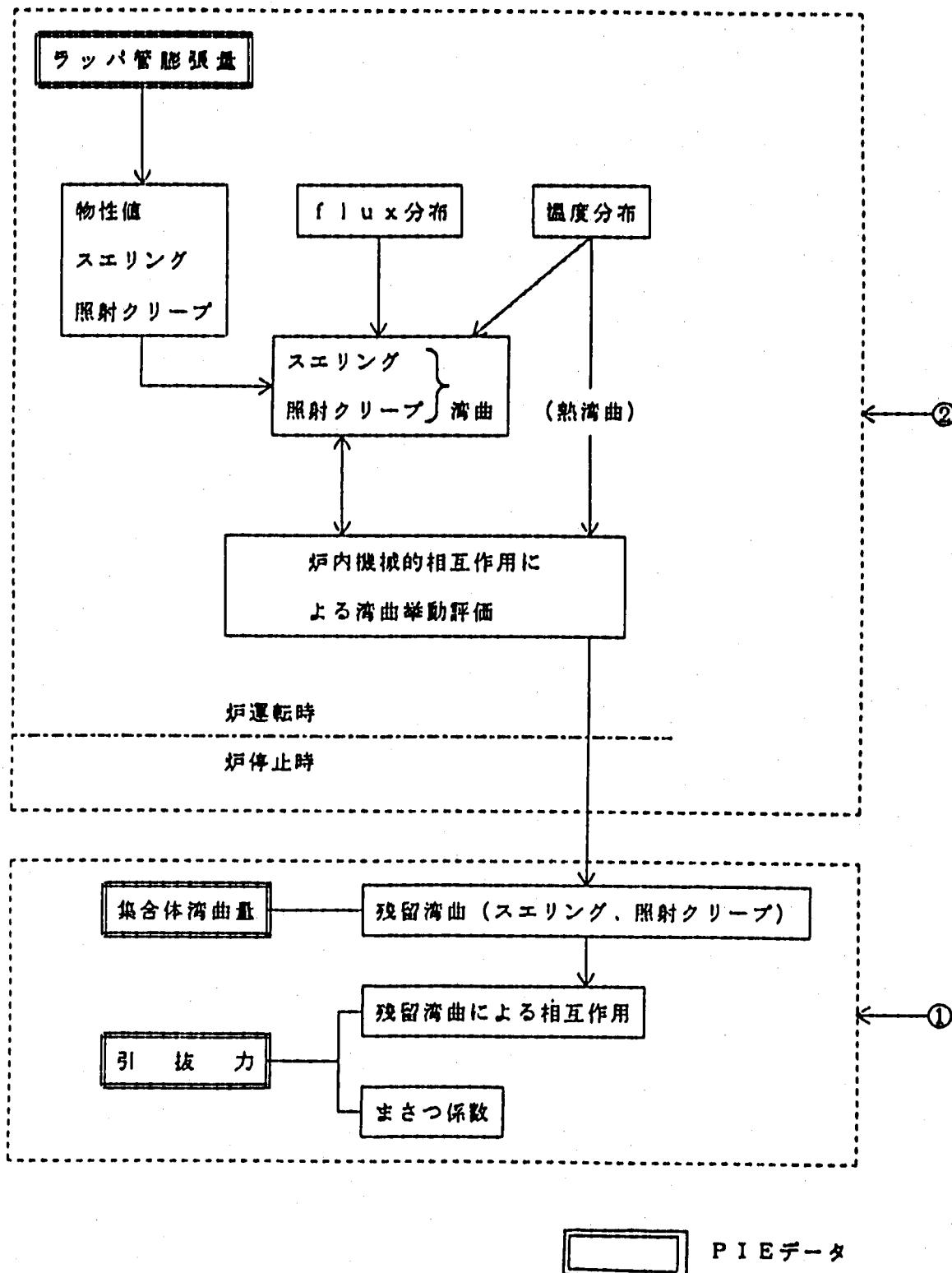


図3.2.2 常陽データの検討

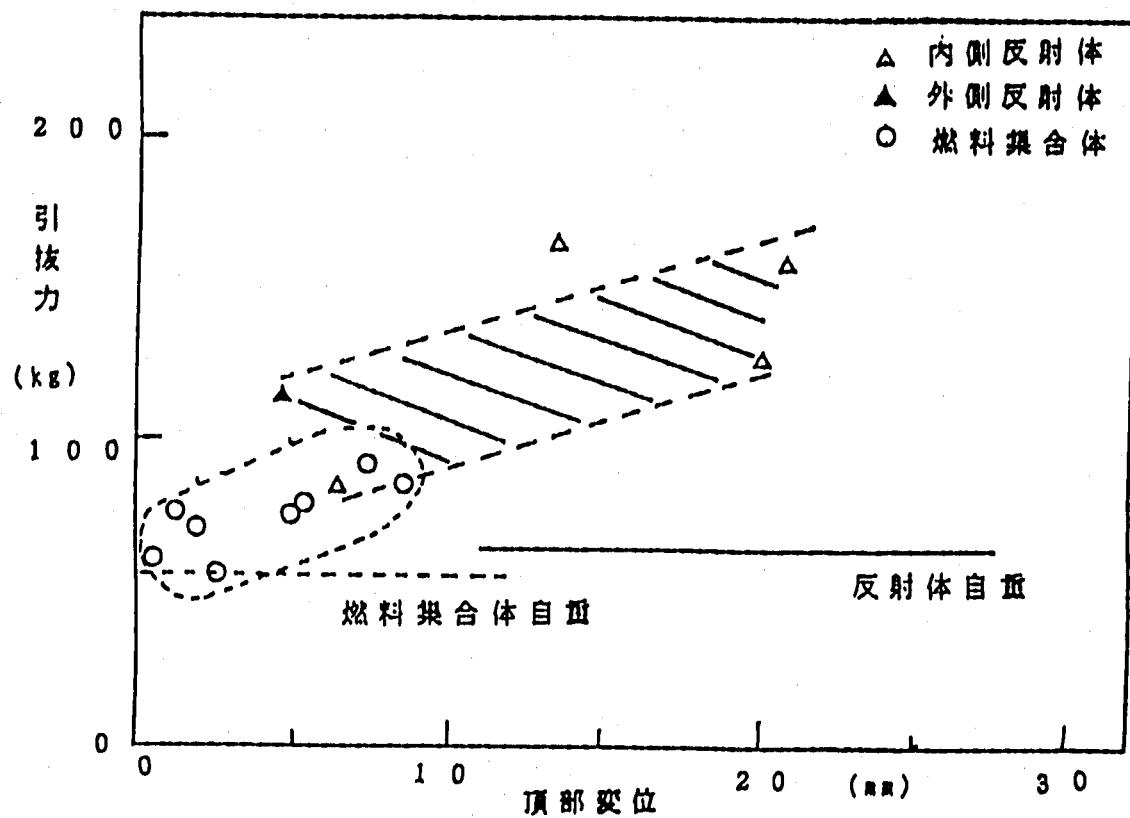


図3.2.3 引抜力と頂部変位の関係

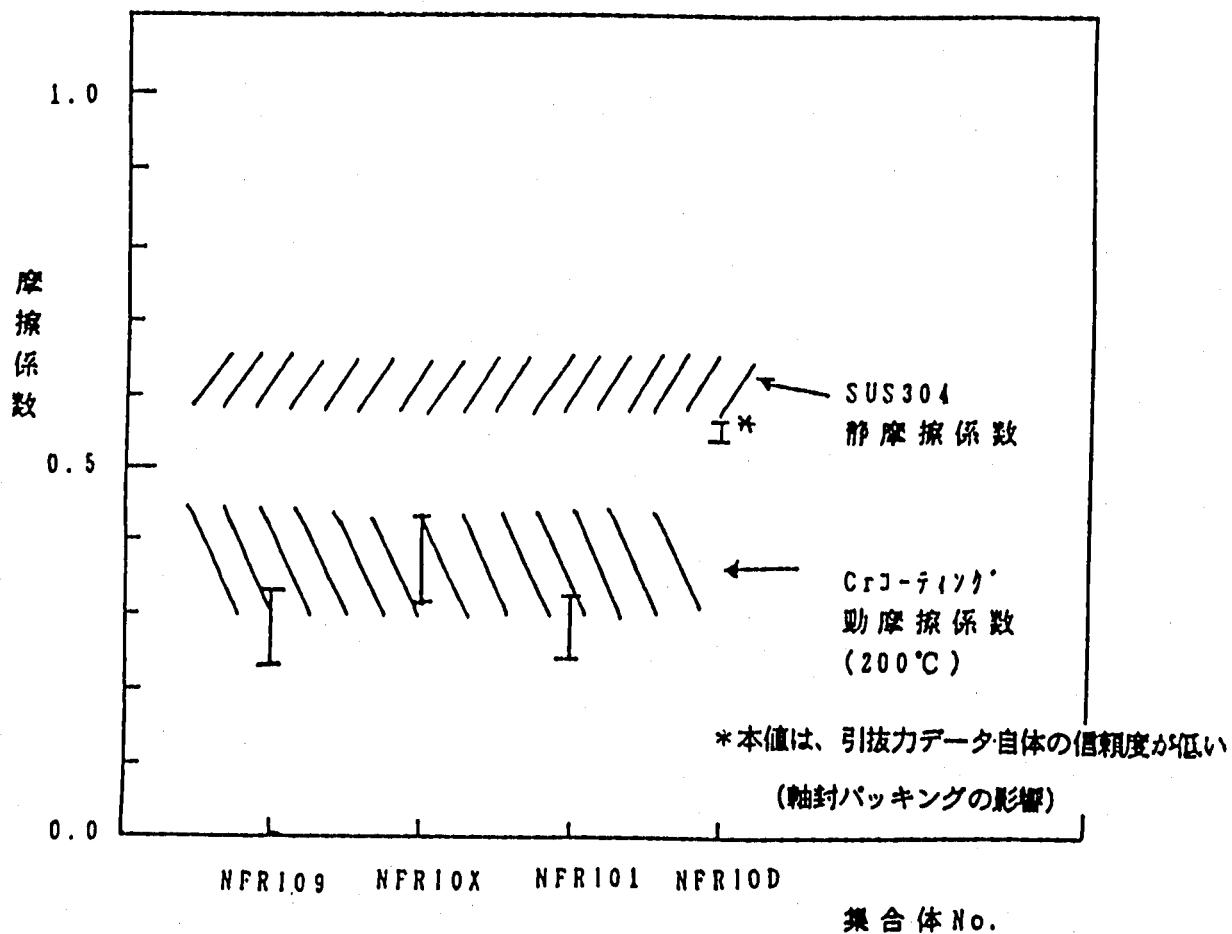


図3.2.4 集合体の摩擦係数

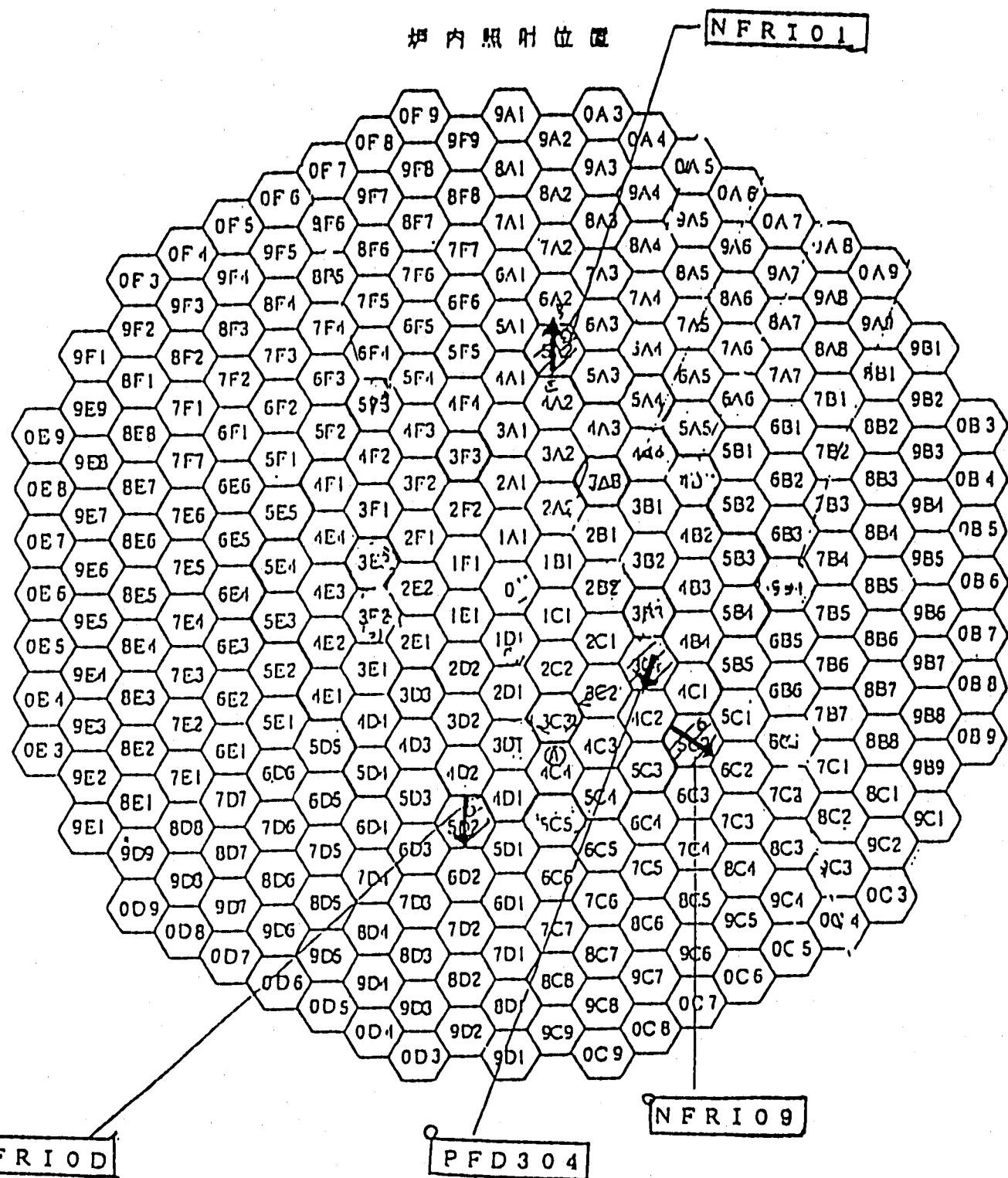


図3.2.5 残留湾曲量評価対象集合体

* PIEで観察された
弯曲方向を正とする。

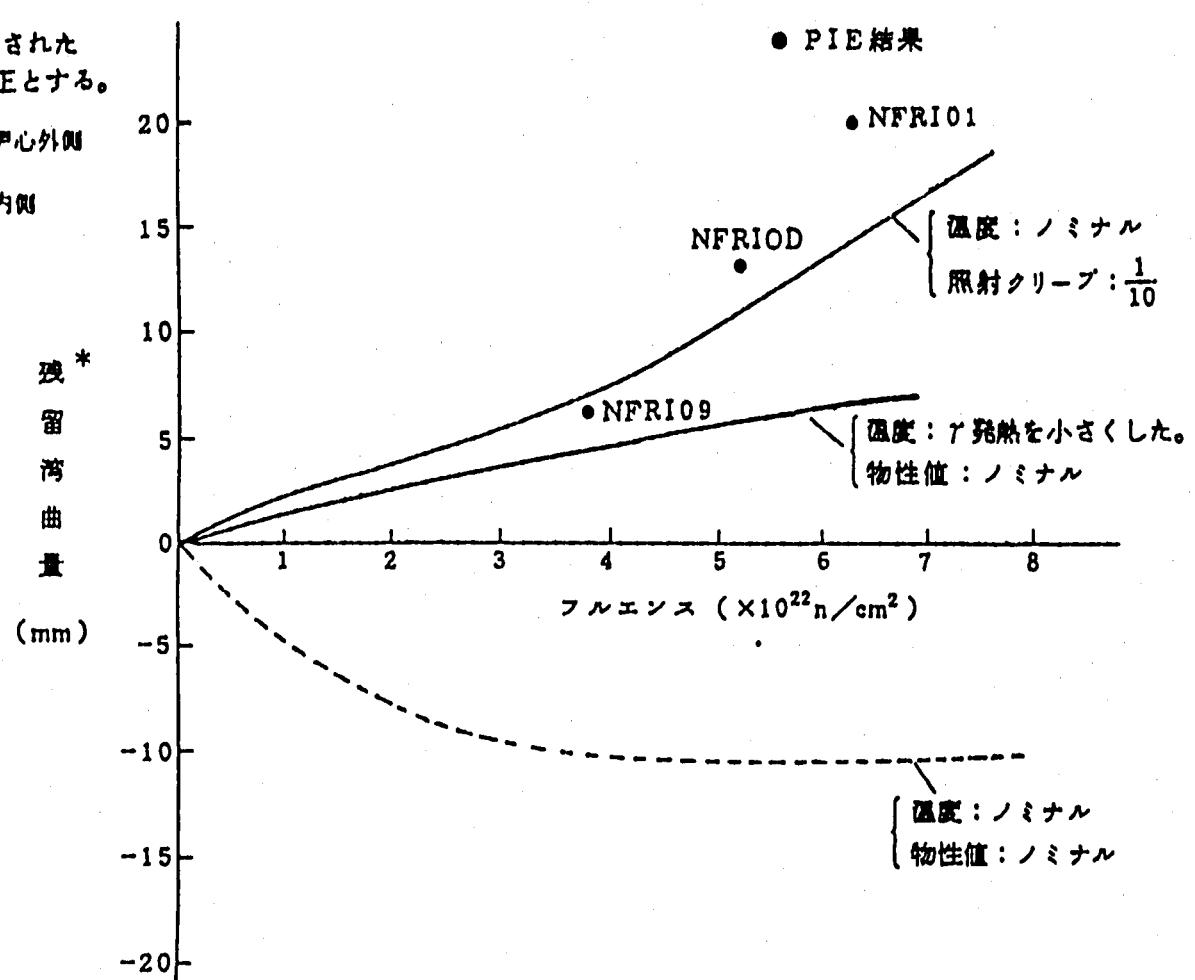
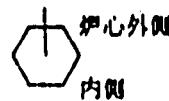
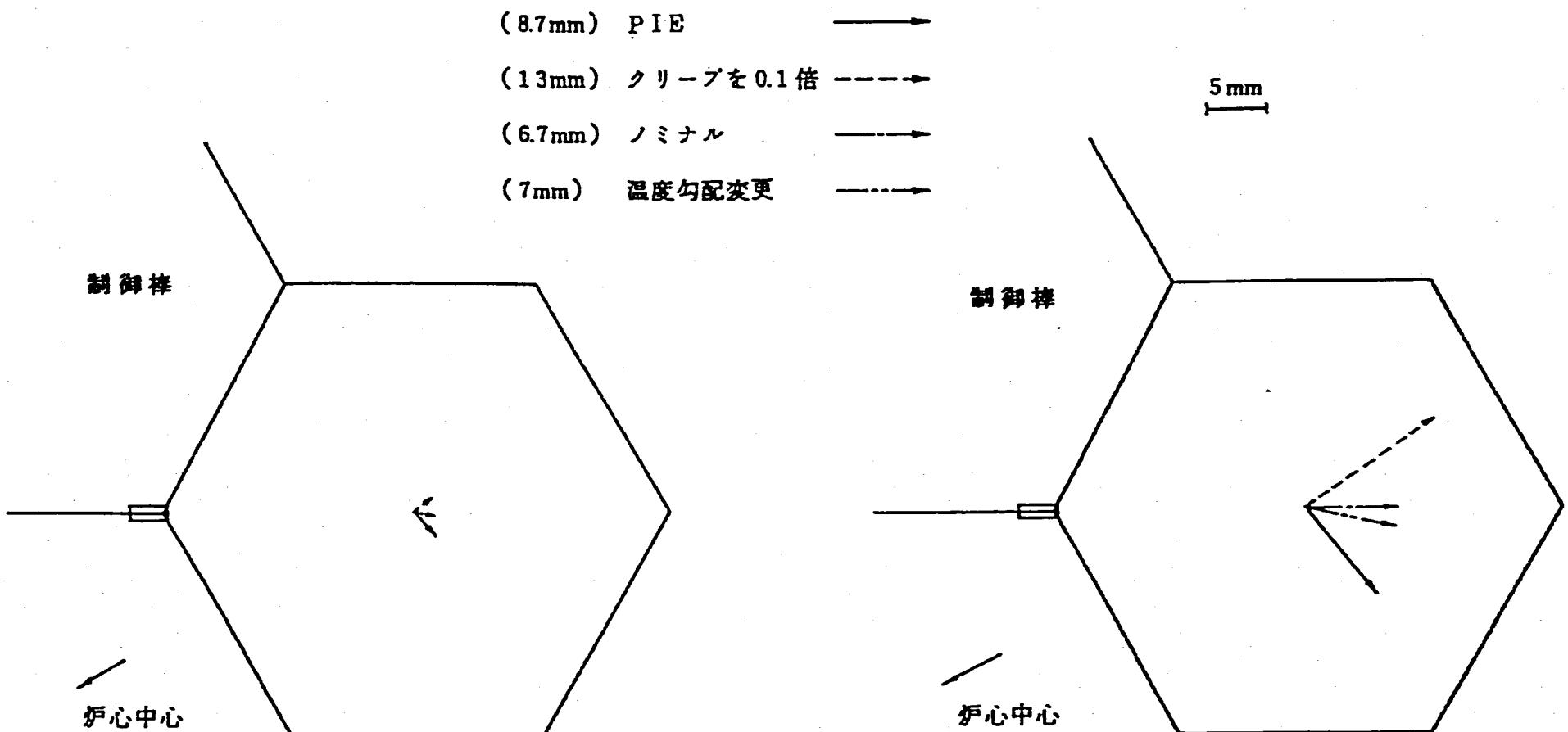


図 3.2.6 内側反射体の残留弯曲量の評価結果



PFD304 集合体残留湾曲量

図3.2.7 燃料集合体の残留湾曲量の評価結果

第4章 改良オーステナイト鋼の物性値について

4.1 改良オーステナイト鋼 (PNC1520) を700°C越えて使用する場合の評価式の適用性

4.1.1 はじめに

改良オーステナイト鋼（以下PNC1520）について、被覆管最高温度を710°Cに設定した場合のその成立性の可能性を材料強度基準（案）に基づき、特に材料的側面から検討した。また今後予定されている高温試験データ取得計画についても述べた。

4.1.2 取得データ温度範囲

各設計評価項目に対して、取得データ温度範囲と材料強度基準（案）で示した適用温度範囲を表4.1.1に示す。取得データの温度範囲が710°Cを包絡していない項目は以下のとおりである。（ボイドスエーリング量は高温では問題にならない）

- ① 内面腐食量
- ② クリープ強さ補正係数
- ③ 照射クリープひずみ
- ④ ナトリウム腐食量
- ⑤ 短時間強さ補正係数
- ⑥ 短時間塑性ひずみ制限値

この内、①と②の項目は、700°C以下までしかその適用を許していない。なお、クリープ強さ補正係数についてはその適用範囲はラーソンミラーバラメータ（LMP）の関係式で記載されているが、例えば700°Cでは約10000時間まで、725°Cでは約3000時間までの適用範囲となる。

以下に上記6項目について、材料強度基準（案）で定められている評価式の710°Cまでの適用可能性について検討した。

4.1.3 評価結果

(1) 高温データ取得による確認が必要な項目

③照射クリープひずみ、④ナトリウム腐食、⑤短時間強さ補正係数、⑥短時間塑性ひずみ制限値については、700°C以下のデータしか取得されていないが、現状の評価式は700°Cを越える温度領域まで外挿できるものと判断している。この内

ナトリウム腐食量については、材料強度基準（案）の適用温度範囲は700℃までになっているが、750℃までの文献値等を参考にすると、現状の評価式で710℃まで外挿することは可能と判断される。これら4項目については、今後照射試験データを取得することにより、現状評価式の700℃以上への外挿の妥当性を確認する予定である。

(2) 高温データの取得が必要な項目

① 内面腐食量

PNC1520の内面腐食挙動は、炉外腐食試験結果からSUS316鋼とほぼ同程度と判断できるため、基準および適用温度範囲は、国産のSUS316鋼燃料ピンのPIEデータの解析結果に基づき策定した。データベースとなるPIEデータは、被覆管内面最高温度は662℃であり、その燃焼度は65,000MWd/tに相当する。

〔710℃までの温度外挿性〕

現状取得データの範囲内では、寿命期間中700℃以上の温度で照射された場合の内面腐食量を評価するのは困難である。

〔データの取得計画〕

高温側データの取得のため、燃料ピン高温照射試験（仮称：FCCI-2）を計画しており、燃料被覆管の温度が700℃を越える状態で、燃焼度50,000、および100,000MWd/tまでの試験データを取得する計画である。ただし、照射開始は平成9年（1997年）で平成13年（2001年）にPIE実施予定である。

② クリープ強さ補正係数

Na中内圧クリープ破断試験データは最高700℃まで、照射下内圧クリープ破断試験データは最高725℃まで取得されている。しかしこれら高温データの破断時間は2,000～4,300時間程度である。このため、本データベースに基づく材料強度基準の適用範囲は、ラーソンミラーパラメータ（LMP）で整理した関係式により設定している。例えば700℃では約10,000時間まで、725℃では約3,000時間までであり、710℃の場合には、5,000時間に僅かに満たない範囲までが適用可能となる。

〔710℃までの温度外挿性〕

PNC1520においては、高温ほど、また長時間側ほど大気中破断データと比較して照射下内圧クリープ破断強度の低下量は大きくなる挙動が観察される。このため現状の取得データに基づき、寿命期間中710℃で照射された場合のクリープ強度補正係数を予測することは困難である。

〔データ取得計画〕

FFFによる材料照射データの取得は今後望めない。このため、現在「常陽」を利用したFFF/MOTAと同様な温度制御型材料照射試験リグ「MARICO」を開発している。MARICOによる照射下内圧クリープ破断試験については、FFF/MOTAからの継続照射および新たに照射を開始する新規照射を計画しているが、平成6年に照射が開始されるMARICO-1では試験温度は最高でも670℃である。平成9年以降に照射されるMARICO-2で700℃以上のデータを取得する計画を検討している。

4.1.4 まとめ

以下の4項目、照射クリープひずみ、ナトリウム腐食、短時間強さ補正係数、短時間塑性ひずみ制限値については、現状の評価式の700℃を越える温度領域までの外挿の妥当性を確認する必要がある。

一方、次の2項目については、以下の対応が必要である。

- ① 内面腐食については、現状得られている試験データからは高温側への外挿の妥当性を示すことは困難と考えられる。そのため、燃料ピン高温照射データの取得を計画している。（照射開始は平成9年から）
- ② クリープ強さ補正係数については、現状取得されている試験データから高温・長時間側への外挿の妥当性を示すことは困難である。今後、「常陽」において温度制御型照射試験リグを用いた700℃以上での照射試験を計画している。
(照射開始は平成9年以降になる見込み)

表4.11 改良オーステナイト鋼 (PNC1520) の材料強度基準の適用範囲

設計評価項目		適用温度範囲	取得データ温度範囲
設計応力強さ	; S_u	室温 ~ 900°C	
設計応力強さ	; S_t	425 ~ 850°C $\sigma_{t1} > 3.2 \text{kgf/mm}^2$	
設計降伏点	; S_y	室温 ~ 900°C	室温 ~ 1000°C
設計引張強さ	; S_u	室温 ~ 900°C	室温 ~ 1000°C
設計クリープ破断応力強さ	; S_c	425 ~ 850°C	600, 650, 700, 750°C 6500h/750°C
許容繰り返し数	; N_d	850°Cまで	600, 650, 700, 750, 850°C
(応力・ひずみ関係式)			
短時間応力・ひずみ	;	室温 ~ 850°C	室温 ~ 850°C
熱クリープひずみ	;	425 ~ 850°C	600, 650, 700, 750°C 6500h/750°C
照射クリープひずみ	;	400 ~ 800°C	405, 495, 550, 605, 670°C ~14760h/670°C
(環境効果)			
ナトリウム腐食	;	400 ~ 700°C	500, 600, 650°C 最長10000h
内面腐食量	;	480 ~ 700°C 燃焼度 最大160000MWd/t	(SUS316鋼) 300~662°C 2600~128000MWd/t
短時間強さ補正係数	;	室温 ~ 750°C	PNC316 : 500~700°C PNC1520: 500~700°C
クリープ強さ補正係数	;	L M P < 19	Na中: 600, 650, 700°C ~4300h/700°C 照射下: 605, 670, 725°C ~1900h/725°C
短時間塑性ひずみ制限値	;	400 ~ 800°C	室温 500~700°C
ポイドスエリング量	;	400 ~ 800°C	405, 495, 550, 605, 670°C 16.7~25.2 × 10 ⁻²² n/cm ³

4.2 改良オーステナイト鋼の物性値について

4.2.1 許容繰返し数 N_a

適用範囲

本基準値は弾性解析の場合と対象とする。適用温度範囲は最高850℃までとし、これを越えての外挿は原則として不可とする。表4.2.1に繰返し回数と N_a と許容ひずみ範囲 ϵ_a を表わす。

データベースおよび策定方法

ASME Code Case N-47に準拠して策定されている高速原型炉燃料集合体の構造設計方針、材料強度基準（案）の値を採用した。

設定根拠

本鋼については許容繰返し数 N_a を独自に策定するまでの十分な評価データが揃っていないために、本基準案においては基本的に「高速原型炉燃料集合体の構造設計方針、材料強度基準案」に規定されている N_a の値をそのまま準用している。

本鋼の600℃以上の高温側の疲労特性（ひずみ速度0.1%/sec）を図1～図5に示す。図中にPNC316（改良SUS316）の平均疲労破損曲線と実験値を併せて示した。本鋼の疲労強度PNC316の平均疲労破損曲線とほぼ同等であり、650℃を越える高温領域においても比較的良好に予測できている。また、低ひずみ側では長寿命側になる傾向が見られ。保守側の値となっている。

疲労特性に対するひずみ速度やひずみ保持の効果の評価データが現状では十分でないが、本鋼の疲労特性はPNC316に類似しており、PNC316の許容繰返し数 N_a を準用しても危険側の評価とはならないと考えられる。したがって、本基準案では「高速原型炉燃料集合体の構造設計方針、材料強度基準案」に記載される設計疲労線図をもって取り扱えるものとした。

従って、改良オーステナイト鋼について許容繰返し数を新たに策定することは考えていらない。

4.2.2 比 熱

評価式

$$C = 0.113 + 4.143 \times 10^{-5} T$$

ここで、

C : 比熱 (cal/g・℃)

T : 温度 (℃)

適用範囲

室温から850℃までとする。

データベース

材 料：改良オーステナイト鋼（60年度試作板材60AK2）

測定方法：断熱型連続法

測定温度：室温～850℃

設定根拠

得られたデータ点を温度の1次式でフィッティングした式を評価式とした。

4.2.3 平均熱膨張係数

評価式

$$a_m = 13.4239 + 0.0403T - 1.2244 \times 10^{-4}T^2 + 1.6384 \times 10^{-7}T^3 - 7.5039 \times 10^{-11}T^4$$

ここで、

a_m : 热膨張係数 (10⁻⁶/℃)

T : 温度 (℃)

適用範囲

室温から850℃までとする。

データベース

材 料：改良オーステナイト鋼（60年度試作板材60AK2）

測定方法：押し棒式測定法

測定温度：室温～850℃

測定根拠

得られたデータ点を温度の4次式でフィッティングした式を評価式とした。

4.2.4 热伝導度

評価式

$$K = 13.51 + 0.017T$$

ここで、

K : 热伝導度 (W/m・℃)

T : 温度 (℃)

適用範囲

室温から850℃までとする。

データベース

材 料 : 改良オーステナイト鋼 (60年度試作板材60AK2)

測定方法 : レーザーフラッシュ法

測定温度 : 室温～850℃

測定根拠

得られたデータ点を温度の1次式でフィッティングした式を評価式とした。

表 4. 2. 1 許容ひずみ範囲 ϵ_t (mm/mm)

温度(°C) 機器C 回数N _c	-30～425	450	475	500	525	550～650	700	750	800	850
10 ¹	0.0448	0.0326	0.0228	0.0160	0.0112	0.00915	0.00420	0.0024	0.0019	0.0015
2×10 ¹	0.0318	0.0219	0.0144	0.00946	0.00614	0.00472	0.00295	0.0019	0.0016	0.00135
4×10 ¹	0.0231	0.0159	0.0102	0.00639	0.00408	0.00322	0.00219	0.00165	0.0014	0.00118
10 ²	0.0168	0.0109	0.00690	0.00439	0.00278	0.00212	0.0017	0.0014	0.00125	0.00112
2×10 ²	0.0125	0.00848	0.00548	0.00348	0.00223	0.00174	0.0015	0.00127	0.00115	0.00104
4×10 ²	0.00956	0.00667	0.00446	0.00293	0.00192	0.00152	0.00132	0.00115	0.00106	0.000977
10 ³	0.00711	0.00502	0.00345	0.00236	0.00161	0.00129	0.00115	0.00102	0.00095	0.000896
2×10 ³	0.00576	0.00413	0.00290	0.00203	0.00141	0.00114	0.00104	0.000946	0.00087	0.000800
4×10 ³	0.00476	0.00347	0.00248	0.00178	0.00127	0.00104	0.000926	0.000855	0.000776	0.000704
10 ⁴	0.00376	0.00279	0.00206	0.00150	0.00110	0.000922	0.000829	0.000749	0.000676	0.000610
2×10 ⁴	0.00316	0.00237	0.00179	0.00133	0.000988	0.000842	0.000753	0.000675	0.000605	0.000542
4×10 ⁴	0.00269	0.00213	0.00159	0.00120	0.000899	0.000762	0.00068	0.000614	0.000551	0.000494
10 ⁵	0.00224	0.00172	0.00132	0.00101	0.000771	0.000662	0.00060	0.000545	0.000495	0.000450
2×10 ⁵	0.00196	0.00155	0.00118	0.000900	0.000693	0.000602	0.000546	0.000494	0.000448	0.000406
4×10 ⁵	0.00176	0.00138	0.00106	0.000808	0.000625	0.000544	0.000494	0.00045	0.000410	0.000374
10 ⁶	0.00151	0.00118	0.000903	0.000694	0.000545	0.000482	0.00044	0.00040	0.000375	0.000352

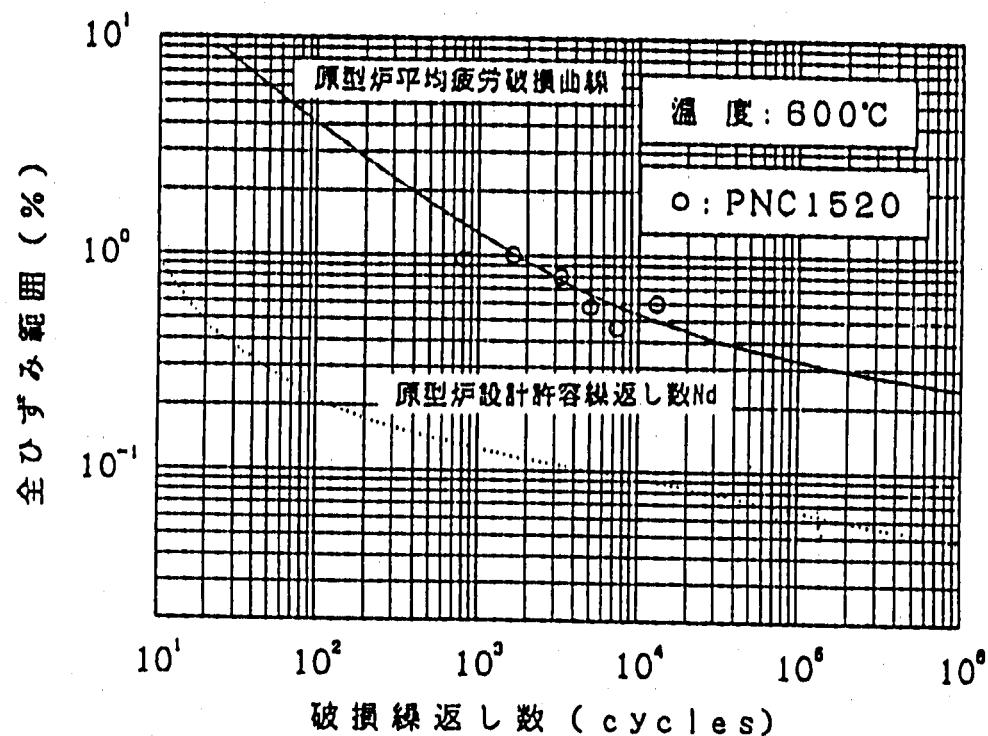


図4.2.1 改良オーステナイト鋼の疲労特性と設計疲労線図との比較 (600°C)

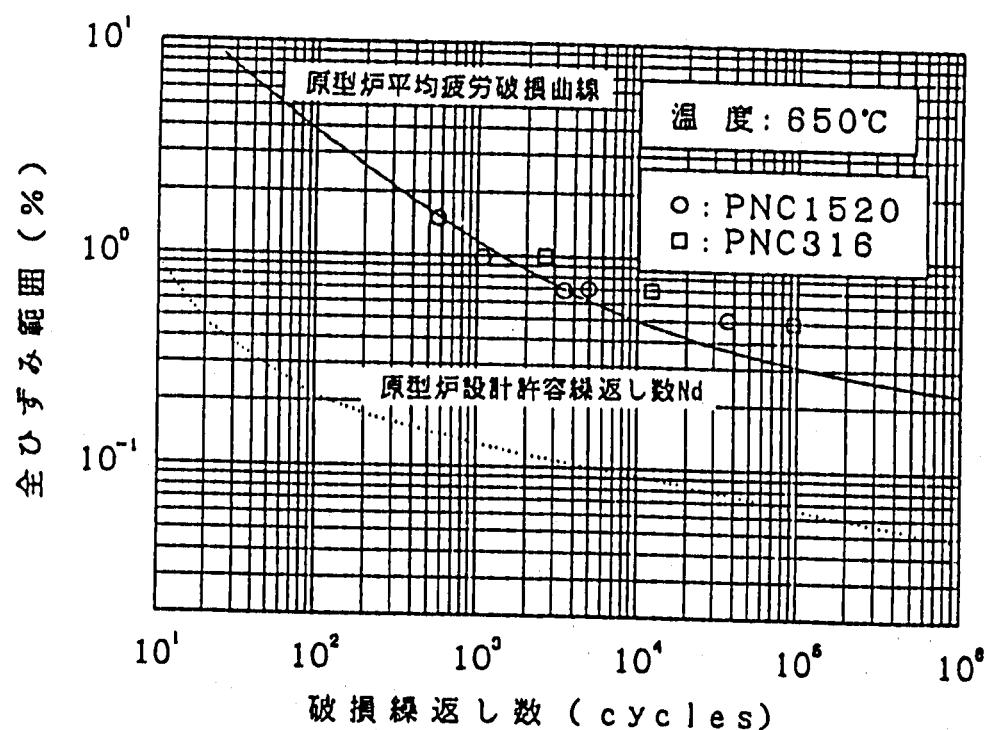


図4.2.2 改良オーステナイト鋼の疲労特性と設計疲労線図との比較 (650°C)

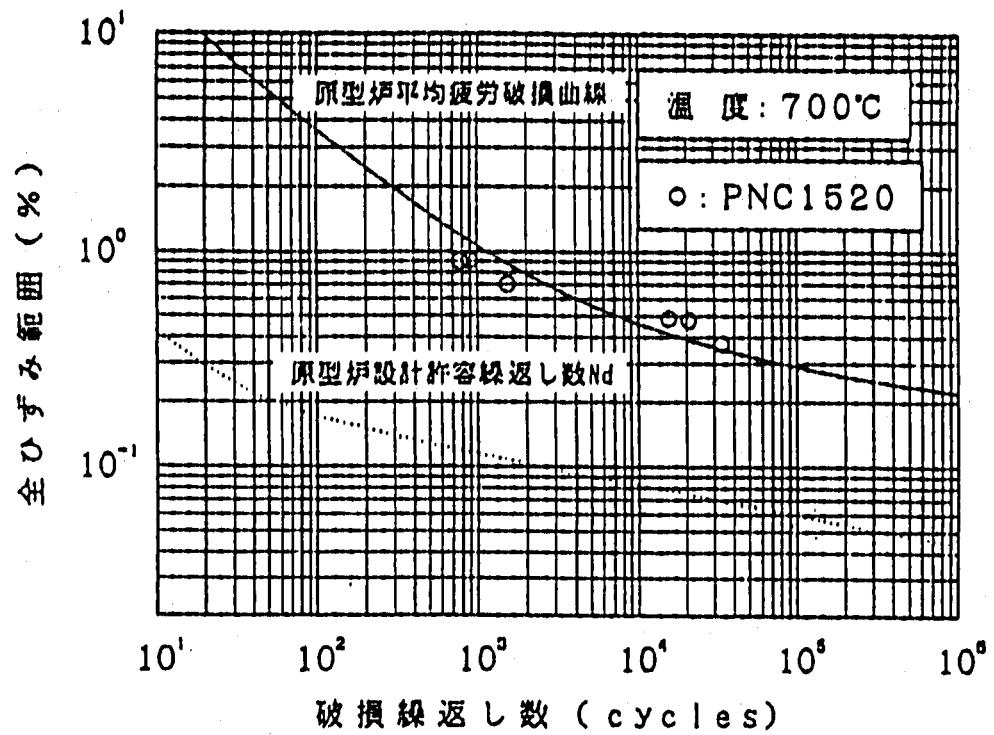


図4.2.3 改良オーステナイト鋼の疲労特性と設計疲労線図との比較 (700°C)

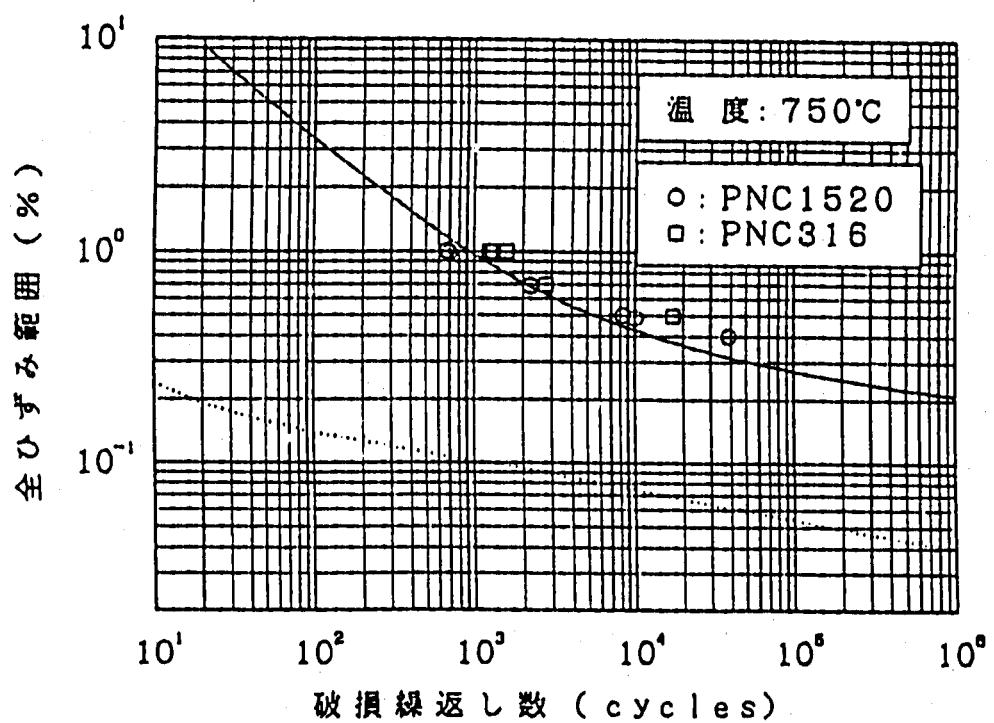


図4.2.4 改良オーステナイト鋼の疲労特性と設計疲労線図との比較 (750°C)

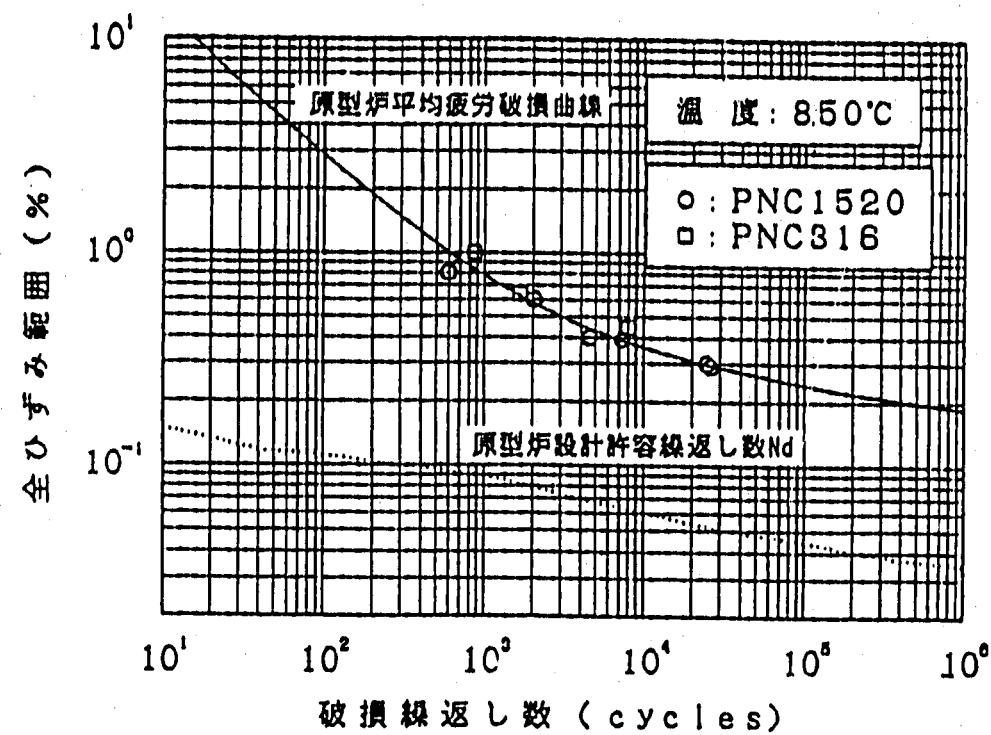


図4.2.5 改良オーステナイト鋼の疲労特性と設計疲労線図との比較 (850°C)