

**PWR燃料の高燃焼度化（ステップ2）及び
燃料の高燃焼度化に係る安全研究の現状と課題
について**

平成13年12月7日

**原子力安全・保安部会
原子炉安全小委員会**

目次

1．はじめに	1
2．PWR燃料の高燃焼度化（ステップ2）について	2
2.1 概要	2
2.2 ステップ2 先行照射燃料の標準仕様	2
2.3 改良被覆管	3
2.4 高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレット	6
2.5 大粒径ペレット	7
2.6 最近の知見	7
2.7 検討結果	9
3．燃料の高燃焼度化に係る安全研究の現状と今後の課題	11
3.1 事業者の高燃焼度化計画	11
3.2 各機関における研究計画	11
3.3 更なる高燃焼度化を進める際の留意事項	14
4．おわりに	15
5．調査審議の経緯	16
図表	17
参考文献	56
用語解説	60

1. はじめに

使用済燃料の発生量の抑制及び燃料の効率的運用を目的とした燃料の高燃焼度化については、我が国の沸騰水型原子炉（以下「BWR」という。）及び加圧水型原子炉（以下「PWR」という。）において段階的に導入されてきている。

BWRについては、既に燃料集合体最高燃焼度を55,000MWd/tとして9×9型燃料集合体が実用化され、PWRについても、被覆管の材質や燃料設計に改良を加え燃料集合体最高燃焼度を55,000MWd/tとした高燃焼度燃料（以下「ステップ2燃料」という。）が開発されている。

燃料の高燃焼度化に関しては、これまで高燃焼度化燃料への現行燃料設計手法の適用性等技術的諸問題に対応するため、平成4～5年において旧通商産業省内に原子力発電技術顧問を委員とする「高燃焼度化検討会」を設置して検討を行っている。

BWRのこれまでの高燃焼度化計画については、「高燃焼度化検討会」において9×9型燃料集合体の基本設計の妥当性を確認した後、少数体による先行照射と並行して、個別プラントの設置変更許可申請に基づき安全審査を行い、現在順次各プラントに9×9型燃料集合体が導入されているところである。

一方、PWRについては、「高燃焼度化検討会」においてステップ2燃料の先行照射について基本的な問題がないことを確認した後、現在、関西電力(株)大飯発電所4号機において少数体による先行照射が行われているところであり、近くステップ2燃料を全炉心に装荷する設置変更許可申請が準備されているところである。

以上の状況を踏まえ、原子炉安全小委員会では燃料ワーキンググループ（以下「燃料WG」という。）において、「高燃焼度化検討会」の検討^[1]以降、新たに蓄積された海外を中心とする炉内の照射データを評価することにより、ステップ2燃料の本格利用に際しての燃料設計評価の考え方を検討するとともに、高燃焼度化に関する最近の知見を整理し、健全性評価上の留意事項についてとりまとめた。

また、燃料の燃焼度は更に延伸されるものと考えられることから、その今後の見通しを整理するとともに、更なる高燃焼度化に係る安全規制を行う上で必要となると予見される課題についての安全研究の進捗状況と今後これを合理的かつ効率的に行うための留意事項についても併せて検討した。

2 . PWR 燃料の高燃焼度化 (ステップ2) について

2 . 1 概要

燃料の高燃焼度化が進むと、

- ・ 燃料の炉内滞在期間の長期化により被覆管の腐食・水素吸収量が増加する
- ・ 核分裂生成ガス (F P ガス) の放出量増加により燃料棒内圧が上昇する

等の燃料健全性に影響を及ぼす可能性のある現象が顕在化すると考えられる。

図2.1-1に燃料の高燃焼度化に伴う影響と開発課題を示す。ステップ2燃料においては、燃料の信頼性向上を図る観点から、材料組成を改良し耐食性の向上等を図った改良被覆管の開発を行うとともに、F P ガス放出量を抑えるための大粒径ペレット及び炉心運用の柔軟性確保を目的とした高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの開発をそれぞれ行ってきたところである。図2.1-2にステップ2燃料の開発実績を示す。

これらステップ2燃料の開発に際し、その健全性を確証し実用化を図ることを目的として、(財)原子力発電技術機構及び電気事業者により、改良被覆管等の炉外試験並びに海外試験炉及び商業炉における照射試験が実施され、これらを通じて炉外試験データ及び照射データが拡充されてきた。表2.1-1に拡充されたデータ項目及びそれらデータが取得された試験炉及び商業炉の運転、照射条件を示す。

現在までに、改良被覆管について燃料棒平均燃焼度で最高約62,000MWd/t (燃料集合体燃焼度56,000MWd/t相当) までの高燃焼度域における照射データが取得・拡充されている。

2 . 2 ステップ2 先行照射燃料の標準仕様

ステップ2 先行照射燃料の標準的な燃料仕様を表2.2-1に示す。ステップ2 先行照射燃料においては、ウラン235濃縮度を約4.5wt% (ガドリニア入り燃料については約2.0wt%) に高め、耐食性向上の観点から改良被覆管が採用されるとともに、炉心運用性向上の観点から高濃度ガドリニア入り燃料 (ガドリニア濃度約10wt%) が、F P ガス放出量低減の観点から大粒径ペレットが採用されている。

その他の燃料集合体の設計において、燃料棒の配列、被覆管の肉厚、グリッドの形状等の基本構造については、現行燃料と基本的に同一である。

2.3 改良被覆管

(1) 概要

原子炉内では、高温の一次冷却水との反応により被覆管の外面に酸化膜が形成される。被覆管の酸化による腐食量は、燃料の高燃焼度化によって、炉内滞在期間が長期化することから増加することとなる。このため、高燃焼度燃料を採用するに際しても健全性を損なわない範囲に腐食量を抑える必要があり、ジルカロイの合金成分を規格範囲内で調整した材料や、ジルコニウム基の新合金が開発されている。ジルカロイ中の合金成分の中でも Sn の含有量は耐食性に影響することが知られており、従来は規格範囲（1.2 ～ 1.7%）の中間値である 1.5%程度の含有量であったもの（従来 Sn ジルカロイ-4）が、最高燃焼度48,000Mwd/tのステップ1燃料では1.3%程度に調整され（低 Sn ジルカロイ-4）、ステップ2燃料においては、ジルカロイの合金組成規格にとらわれない改良被覆管としてMDA、NDA及びZIRLO™*（以下「ZIRLO」という。）が開発されている。これら改良被覆管の合金組成を表2.3-1に示す。なお、MDA、NDA及びZIRLOとは被覆管材の名称で、MDAは三菱重工業(株)、NDAは原子燃料工業(株)、ZIRLOは米国ウエスチングハウス社により開発されたものである。

MDAは、豊富な照射実績を持つジルカロイ-4をベースとして、耐食性向上のためSn含有量を低下させ、さらに水素吸収率の低減と機械的強度の向上のためにNbを添加したSn-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム基合金である^{[2],[3]}。

NDAは、MDAと同様、ジルカロイ-4をベースとして、耐食性向上のためSn含有量を低下させるとともにNb及びNiを添加し、さらに機械的強度を維持するためFe及びCr含有量を若干増やしたSn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金である^[4]。

ZIRLOは、耐食性が良好で水素吸収率も低いと考えられているZr-Nb二元合金をベースとして、機械的強度の向上のためSn及びFeを添加したSn-Fe-Nb系ジルコニウム基合金である^{[5],[6],[7]}。

また、耐PCI性向上を目的に、被覆管の冷間圧延加工の工程を調整することによって、被覆管の結晶方位を一定方向に配向させている。

* ZIRLO™ は、ウエスチングハウス社により商標登録されたものである。

(2) 腐食及び水素吸収

「高燃焼度化検討会」では、改良被覆管について、炉外腐食試験の結果等から、従来Snジルカロイ-4及び低Snジルカロイ-4に比べ、腐食速度が小さく、水素吸収率についても同等以下であることが確認されている(図2.3-1及び図2.3-2、図2.3-3及び図2.3-4)。

今回、改良被覆管の酸化膜厚さ及び水素吸収量の測定データが試験炉及び商業炉において高燃焼度域まで拡充されており、燃料棒平均燃焼度で最高約62,000MWd/tまで得られている。燃焼度と酸化膜厚さの関係について、MDA及びZIRLOの測定結果を図2.3-5に、NDAの測定結果を図2.3-6に示す。また、水素吸収量は酸化膜厚さと相関があり、酸化膜厚さと水素吸収量の関係について、MDA及びZIRLOの測定結果を図2.3-7に、NDAの測定結果を図2.3-8に示す。

これらのデータから、高燃焼度域における改良被覆管の耐食性については、従来Snジルカロイ-4及び低Snジルカロイ-4に比べて向上しているものと考えられる。また、改良被覆管の水素吸収量と酸化膜厚さの比に対応する水素吸収率については、従来Snジルカロイ-4及び低Snジルカロイ-4と同等であると考えられる。

(3) 材料物性

改良被覆管の溶融点、密度及び熱伝導率の測定結果を、MDA及びZIRLOについては表2.3-2、図2.3-9、NDAについては表2.3-3、図2.3-10に示す。これらの結果から、改良被覆管の材料物性がジルカロイ-4とほぼ同等であることが「高燃焼度化検討会」において確認されている。

(4) 機械的性質

「高燃焼度化検討会」では、未照射の改良被覆管の機械的強度、延性、疲労強度について、機械的強度に関してはジルカロイ-4に比べ若干低くなるもののジルカロイ-4の規格内であり、また延性、疲労強度はジルカロイ-4と同等であり、いずれも設計評価上ジルカロイ-4と同等に取り扱えることが確認されている。

今回、改良被覆管の引張試験及び疲労強度の測定データが高燃焼度域まで拡充されており、MDA及びZIRLOについて、引張試験結果を図2.3-11に、疲労強度測定結果を図2.3-12に、またNDAについて、引張試験結果を図2.3-13に、疲労強度測定結果を図2.3-14に示す。

これらのデータから、高燃焼度域における改良被覆管の機械的強度、延性、疲労強度についても、ジルカロイ-4と同等であると考えられる。

(5) 照射に伴う寸法変化(炉内クリープ及び照射成長)

「高燃焼度化検討会」では、被覆管の炉内クリープ(外径変化)及び照射成長はSn及びNbの固溶量に依存し、その固溶量が多い程小さくなる^{[8]・[9]}ことから、MDA及びZIRLOの炉内クリープはジルカロイ-4に比べ小さく、またNDAはジルカロイ-4と大差ないとしている。

今回、改良被覆管の炉内クリープ及び照射成長の測定データが高燃焼度域まで拡充されており、MDA及びZIRLOの炉内クリープ測定結果を図2.3-15(1)～(4)に、照射成長の測定結果を図2.3-16に、またNDAの炉内クリープ測定結果を図2.3-17(1)～(3)に、照射成長の測定結果を図2.3-18に示す。

これらのデータから、MDA及びZIRLOの外径変化量は、ペレットと被覆管の接触が生じるまでの燃焼初期においてジルカロイ-4に比べ小さく、また、NDAについてはジルカロイ-4と同等であると考えられる。照射成長については、MDA、ZIRLO及びNDAのいずれについても、ジルカロイ-4に比べて小さいと考えられる。

(6) 耐PCI性

被覆管は、腐食性FPガス雰囲気下において、出力急昇によりペレットが熱膨張して被覆管との機械的相互作用(PCM I)を生じ、被覆管に過大な応力が作用した場合、応力腐食割れ(SCC)による破損(PCI破損)を起こす。このPCI破損におけるSCCは、 α -Zr稠密六方晶の底面にほぼ平行な面上を伝播する^[10]ため、この底面をPCM I時の発生応力方向、すなわち周方向に配向(C軸を径方向に配向)することにより、PCI破損の抑制を図ることが可能である。

被覆管の耐PCI性能を確認するため、試験炉において出力急昇試験が実施されており、最大線出力及び線出力変化幅について同時にある値(PCI破損しきい値)を超えた場合にPCI破損が起こることが経験的に知られている。

今回、改良被覆管の出力急昇試験データが高燃焼度域まで拡充されており、MDA及びZIRLOの耐PCI性を図2.3-19に、NDAの耐PCI性を図2.3-20にPCI破損しきい値とともに示す。

これらのデータから、改良被覆管の耐PCI性については、PCI破損しきい値に対して十分余裕があると考えられる。

2.4 高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレット

(1) 材料物性

燃料の高燃焼度化に当たっては、炉心運用の柔軟性を確保する観点から、ガドリニア(Gd₂O₃)濃度を約10wt%まで高めた高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットが開発されている。

「高燃焼度化検討会」では、溶融点、熱膨張係数及び熱伝導率の測定結果から、溶融点及び熱伝導率はガドリニア濃度の増加とともに低下すること、また、熱膨張係数については、ガドリニア濃度の増加にかかわらず約10wt%まではほぼ一定であり、二酸化ウランペレットと同等であることが確認されている。これらの測定結果を、図2.4-1～図2.4-6に示す。

このうち熱伝導率については、先行照射燃料では安全側に現行のガドリニア入り二酸化ウラン燃料設計に用いているFukushimaらのデータに基づいた熱伝導率モデルを採用しているが、Fukushimaらのデータは測定試料の微細割れの影響により熱伝導率を過小評価している可能性が指摘されており^[11]、今後、電力共通研究のデータやHiraiらによるデータを踏まえ、適切な熱伝導率モデルを検討する必要がある。

(2) 照射挙動

「高燃焼度化検討会」では、照射試験データをもとに、高濃度ガドリニア入り二酸化ウラン燃料のFPガス放出率及び寸法安定性(ペレット密度の燃焼に伴う変化)は、二酸化ウラン燃料と同等であることが確認されており、また、図2.4-7及び図2.4-8に示す出力急昇試験の結果から、耐PCI性についても二酸化ウラン燃料と同等であることが確認されている。

今回、高濃度ガドリニア入り二酸化ウラン燃料のFPガス放出率及び寸法安定性の測定データが試験炉照射により高燃焼度域まで拡充されている。高濃度ガドリニア入り二酸化ウラン燃料のFPガス放出率を図2.4-9(1),(2)及び図2.4-10(1),(2)に、寸法安定性を図2.4-11及び図2.4-12に示す。これらの結果から、いずれも二酸化ウラン燃料と同等であると考えられる。

2.5 大粒径ペレット

F P ガスの放出機構には、燃料温度に依存しないリコイル・ノックアウト放出と高温域で支配的な拡散放出があり、高燃焼度化に伴うF P ガスの放出増加には、主に拡散放出が影響すると考えられている。ペレット結晶粒径を大きくすると、F P ガスの結晶粒内から結晶粒界への移動に要する時間が長くなり、この拡散放出の抑制が期待されることから、燃料棒内圧を低減する方策の一つとして大粒径ペレットが開発されてきた。

「高燃焼度化検討会」では、図2.5-1に示す低燃焼度域における出力急昇試験等の結果に基づき、大粒径化によるF P ガス放出の低減が確認されている。

今回、大粒径ペレットのF P ガス放出率について、出力急昇試験及び定常照射試験における照射データが高燃焼度域まで拡充されている。出力急昇試験を行った後のF P ガス放出率測定結果を図2.5-2及び図2.5-3に、また、定常照射試験における測定結果を図2.5-4及び図2.5-5に示す。

今回の測定結果では、拡散放出が支配的となる高燃焼度域、高出力照射条件下でのデータが少なく、大粒径ペレットのF P ガス放出率低減効果を定量的に示すデータは認められていない。

2.6 最近の知見

(1) ペレット熱伝導率の燃焼度依存性

原子炉内での照射により、ペレット中には照射欠陥やF P が生成、蓄積されることから、これらのペレット熱伝導率への影響が考えられるが、従来、ペレット熱伝導率の燃焼に伴う変化を評価するためのデータは十分ではなかった。

最近の研究において、図2.6-1に示すようにH a l d e n 炉で約83,000MWd/t (約73 MWd/kg \cdot UO₂) の高燃焼度までの燃料中心温度測定データが得られている^[12]。この燃料中心温度は一定出力条件に規格化されたものであるが、これより燃料中心温度の燃焼度依存性、つまりペレット熱伝導率が燃焼度に依存して低下することが確認できる。また、照射済みペレットの炉外での熱拡散率測定が精度良く実施できるようになり、図2.6-2に示すようなペレット熱伝導率の燃焼度依存性を示す測定データが複数報告^[13]、^[14]、^[15]されている。その結果、燃焼に伴うペレット熱伝導率の低下について、燃料挙動評価解析コードに組み込むモデルの構築が可能となっている。

(2) ペレットリム組織の形成

ペレットの外周部（リム部）では燃焼度がペレット平均より1.5～2倍ほど速く増加し（リム効果）、その結果、図2.6-3に示すような結晶粒の細粒化と微小気孔の形成を特徴とする組織変化が観察される^[16]。このような高気孔率組織、即ちリム組織の形成による密度の低下、F P ガスの放出、熱伝導度と機械的性質の変化、および昇温時のガス放出挙動について、現在我が国や欧米の機関で研究が進められている。

リム組織は、図2.6-4に示すディスクペレットによる等温照射試験の結果から、照射温度1,100 以下の条件で局所的な燃焼度45,000MWd/t付近から形成され始めることが報告されている^[17]。商業炉燃料でのリム組織の形成はペレット外周部の狭い領域のみに認められており、図2.6-5に示すとおり、ペレット燃焼度約67,000MWd/tまで照射されたペレットでも、金相観察に基づくリム組織の領域幅は半径の8%程度に限られており、その気孔率は最外周部で15%程度である^[18]。

リム組織からのF P ガス放出については、図2.6-6に示す商業炉にてペレット燃焼度約55,000MWd/tまで照射されたペレットの蛍光X線分析（XRF）によると、リム組織においてもF P ガスが保持されていることが確認できる^[19]。熱拡散率についても組織変化の前後で大きく変化しないことが報告されている^[20]。

(3) 事故時における燃料の健全性

事故時における高燃焼度燃料の健全性に関しては、反応度事故（R I A）及び冷却材喪失事故（L O C A）時の健全性を確認する実験が行われている。R I A時の燃料破損に関しては、「高燃焼度化検討会」での検討以降に日本原子力研究所のN S R RやフランスI P S NのC A B R I炉における実験データが追加取得され、その結果を基に原子力安全委員会の専門部会報告書「発電用軽水型原子炉施設の反応度投入事象における燃焼の進んだ燃料の取扱いについて」（平成10年4月13日）が策定されている。一方、L O C A時における高燃焼度燃料の健全性を評価するための具体的な研究は現在我が国や欧米の機関で実施されているところである。

L O C A時には高温水蒸気による酸化により被覆管は脆化し、これが著しい場合には、再冠水時に生じる熱応力や熱衝撃により被覆管が破断する可能性がある。このような事象を防止するために被覆管の脆化に関する基準（最高被覆管温度1,200 以下、化学量論的酸化量が被覆管厚さの15%以下）が「軽水型動力炉の非常用炉心冷却系の性能評価指針」の中で定められている。

この基準については、図2.6-7に示すとおり L O C A 状態を模擬し、燃料を水蒸気雰囲気中で加熱した後、軸方向の収縮を完全に拘束する条件下でこれを急冷して破損させる保守的な実験によりその裕度が十分にあることが確認されているが、近年実施された燃焼末期の被覆管状態（通常運転時の被覆管外面腐食に伴う水素吸収を模擬した水素添加未照射管）を模擬した急冷試験（軸方向完全拘束条件）において、図2.6-7に示すとおり通常運転時の水素吸収が過度に進んだ場合には L O C A 時の破断限界酸化量が低下する可能性があるという結果が得られている^[21]。

一方、被覆管は支持格子のバネの摩擦力によって保持される設計で、L O C A 時において被覆管の膨れや被覆管と支持格子部材との共晶反応等による拘束を受けるとしても、軸方向完全拘束条件下の急冷試験はあまりにも保守的な結果を与えると考えられること^[22]から、中間的な軸方向拘束条件下でも急冷試験が実施されている。支持格子等の燃料集合体設計が違くと軸方向拘束条件も異なることも勘案し、三菱重工業(株)製燃料集合体の被覆管材料である低Snジルカロイ - 4、M D A 及び Z I R L O については20kgf及び50kgfの軸方向拘束条件で、原子燃料工業(株)製燃料集合体の被覆管材料である N D A については16kgfの軸方向拘束条件で急冷試験を行ったところ、図2.6-8～図2.6-10に示すとおり酸化量15%では燃料被覆管の健全性が保たれるという結果が得られている^{[23],[24]}。

2.7 検討結果

燃料特性について、改良被覆管、高濃度ガドリニア入り燃料等について、高燃焼度域での炉内照射試験のデータが得られており、今回これらのデータ等を評価することにより、ステップ2燃料の本格利用に際しての燃料設計評価の考え方を検討するとともに、高燃焼度化に関する最近の知見を整理し、健全性評価上の留意事項についてとりまとめた。

改良被覆管については、これら拡充された照射データを踏まえても、「高燃焼度化検討会」での検討結果と同様、耐食性については従来Snジルカロイ - 4 及び低Snジルカロイ - 4 被覆管に比べて向上していることが認められる。また、水素吸収率、材料物性（溶融点、密度、熱伝導率）、機械的性質及び耐 P C I 性については、設計評価上、ジルカロイ - 4 と同等に取り扱えるものと考えられる。照射に伴う寸法変化（炉内クリーブ及び照射成長）については、設計評価上、改良被覆管それぞれの特性を踏まえた評価を行うことが適切であると考えられる。

また、高濃度ガドリニア入り燃料についても、「高燃焼度化検討会」での検討結果と同様、F P ガス放出率、寸法安定性（ペレット密度の燃焼に伴う変化）及び耐P C I 性について、二酸化ウラン燃料と同等であると考えられる。溶融点及び熱伝導率については、「高燃焼度化検討会」にて、ガドリニア濃度の増加とともに低下することが確認され、先行照射燃料において機械設計上その低下を保守的に考慮しているところであるが、今後の評価においては、最近の熱伝導率に関するデータを踏まえ適切に評価することが求められる。

しかし、大粒径ペレットについては、現時点ではデータ数が少なく、F P ガス放出低減効果を定量的には確認できなかった。

高燃焼度まで照射されたペレットについてペレット熱伝導率の燃焼度依存性及びペレットリム組織の形成を示す照射データが得られており、設計評価上、これらデータを踏まえた評価を行うことが適切であると考えられる。

なお、最近の知見としてL O C A時の燃料棒急冷破断試験結果が得られているが、今後、急冷時の熱衝撃に対する水素脆化の影響や現実的な軸方向拘束条件について、更に検討を加えていく必要があると考えられる。一般的に燃焼度が進んだ状態では、燃焼初期に比べて出力密度が低下しており、L O C A時の燃料被覆管の最高温度及び酸化量はともに燃焼初期に比較して小さくなるものと考えられるが、安全審査においては、燃焼初期及び末期の燃料被覆管の最高温度及び酸化量を評価し、燃焼に伴う水素吸収を考慮しても十分保守的な値であることを確認することが適切であると考えられる。

以上より、先の「高燃焼度化検討会」の検討結果を踏まえ、高燃焼度域での炉内照射試験データ等を評価した結果、改良被覆管や高濃度ガドリニア入り二酸化ウラン燃料を使用したステップ2 燃料を本格採用することについて基本的に問題はないものと考えられるが、安全性の評価は、基本的に装荷を行うそれぞれの原子炉の安全審査の際に行われるべきものであることは言うまでもない。

3 . 燃料の高燃焼度化に係る安全研究の現状と今後の課題

3 . 1 事業者の高燃焼度化計画

原子力発電所から発生する使用済燃料発生量の抑制の観点から、今後も更なる燃料の燃焼度延伸が図られる見通しである。現在、電気事業者においては、炉型に応じた高燃焼度計画を有している。

PWRを有する各社においては、前述のとおり、当面の燃料集合体最高燃焼度を55,000MWd/tまで引き上げることが計画しており、引き上げに要する許認可等の手続を考えると、当分の間は55,000MWd/tで運用されることとなる。従って、その後の燃料集合体最高燃焼度の目標をどこに置くかは今後の課題としているが、燃料加工施設の制約等の観点から、60,000MWd/tを超えるあたりに目標をおいて検討を進めている。この際の被覆管は55,000MWd/tで採用予定の改良被覆管で対応可能かどうかも含めて検討することとしている。

BWRを有する各社においては、現在、9×9型燃料集合体の最高燃焼度55,000MWd/tはそのままで、取出平均燃焼度を50,000MWd/t（従来は45,000MWd/t）に増加させることにより燃料の高燃焼度化を進める計画を有している。更なる高燃焼度化についての当面の目標は取出平均燃焼度55,000MWd/t程度にする予定で、その際の燃料集合体最高燃焼度は約65,000MWd/t程度になるものと考えられ、燃料設計は10×10型燃料を予定している。

また、電気事業者においては軽水炉でのMOX燃料利用を進めており、現在計画中のMOX燃料集合体最高燃焼度はPWRで45,000MWd/t、BWRで40,000MWd/tとなっている。今後は国内導入実績、海外実績等の結果を踏まえ、MOX燃料についてもウラン燃料と同程度まで順次高燃焼度化していくことを電気事業者において検討を進めている。

3 . 2 各機関における研究計画

以上のように、電気事業者においては今後とも燃料の燃焼度を延伸させていく計画であるが、それに伴い燃料の健全性及び安全性確認のための研究計画を進めていく必要がある。電気事業者、(財)原子力発電技術機構、日本原子力研究所及び(財)電力中央研究所においては、以下のような研究を進めているところである。

(1) PWR 保有電気事業者

現在、国内商業炉においてステップ2燃料の少数体先行照射を継続中であり、高燃焼度データ拡充のため先行照射燃料に対する照射後試験（PIE）を計画している。また、FPガスの放出を低減させて燃料棒内圧上昇を抑制するため、ペレット結晶粒径を従来より大きくした大粒径ペレットに関する研究を継続するとともに、高燃焼度域でのリムに関する研究、ステップ2燃料用改良被覆管の55,000MWd/tを超えた高燃焼度域での改良効果確認のために、海外商業炉や海外試験炉での照射試験を実施しているところである。

また、被覆管の開発には長期間を要することから、ステップ2燃料で採用されたZIRLO、MDA等の被覆管に改良を加えた新たな被覆管候補の海外炉での照射試験についても一部着手するとともに、併行して、被覆管の選択肢を増やすため、海外で良好な実績を有しているM5についても検討するとしている。

(2) BWR 保有電気事業者

現在、国内商業炉において9×9型の燃料集合体の少数体先行照射を継続中であり、PWRと同様に高燃焼度データ拡充のため先行照射燃料に対するPIEを計画するとともに、更なる高燃焼度データの拡充を目的として、必要な許認可取得を前提として前記少数体先行照射中の燃料の最高燃焼度を更に伸長させることも検討している。また、40,000MWd/tを超えるMOX燃料の高燃焼度データ拡充のために海外炉において先行照射を実施しているところである。

また、耐食性向上及び水素吸収量低減の観点から、改良被覆管の材料研究を進めており、このうち高Feジルカロイ-2被覆管については、海外商業炉で先行照射を実施しているが、国内炉での先行照射についても検討している。

さらに燃料の燃焼度が高くなるにつれて問題となるFPガスの放出を低減させ、かつ、PCI抑制の観点から改良ペレットの材料研究も進めており、現在、海外商業炉で先行照射を実施しているところである。

(3) (財)原子力発電技術機構

(財)原子力発電技術機構では、燃料の高燃焼度化に対応して、安全性、信頼性の実証、国の安全審査の際の技術的根拠となるデータを提供することを目的に、国からの委託を受けて、a) 高燃焼度等燃料安全試験、b) 燃料集合体信頼性実証の2プロジェクトを実施している。

両プロジェクトにおいて、現在実施中のPWR、BWRそれぞれの少数体先行照射燃料と同様な仕様である燃料のPIEを実施し、通常運転時におけるFPガス放出率の変化、ペレット外周部でのリム領域形成、燃料ペレットと被覆管のボンディング状況、被覆管の腐食減肉量、被覆管の照射脆化・水素脆化及び過渡時の出力急昇性能、新しく見出された被覆管外表面からの破損メカニズムの究明等についてデータを取得しており、今後も更なる高燃焼度領域〔燃料棒燃焼度約70,000～75,000MWd/t（燃料集合体燃焼度約60,000～65,000MWd/tに相当）〕での安全裕度確認のためデータの拡充を図ることとしている。

また、MOX燃料については、国からの委託を受け、現行MOX燃料設計手法の信頼性の確認、実証を進めており、得られたデータは将来の高燃焼度化MOX燃料の評価手法の妥当性検証にも役立てるとしている。

（４）日本原子力研究所

日本原子力研究所では、「高度化軽水炉燃料試験計画」と称して軽水炉燃料の利用に係る情勢変化に積極的に対応するため、日本原子力研究所が有する実験施設やこれまでの経験を活用して、高燃焼度燃料に対する今後の国の規制対応に不可欠な情報を提供するプロジェクトを進めている。

本計画の重点は、高燃焼度燃料のLOCA時やRIA時などにおける燃料挙動確認及び被覆管の機械特性評価手法の検討であり、NSRRパルス照射実験、出力急昇時挙動試験、LOCA時挙動試験、各種材料試験及び照射後試験を行うこととしている。

一方、現行の許認可燃焼度を超える燃焼度で、かつ今後の規制判断データベースがカバーすべき燃焼度範囲まで使用された高燃焼度ウラン燃料及び高燃焼度MOX燃料を国内で調達することは困難である。このため、日本原子力研究所では、欧州の商業炉において高燃焼度まで使用された燃料を入手し、その一部に対してはHalden炉等において追加照射試験等を行い、電気事業者が計画している次段階の高燃焼度化計画までカバーできる燃焼度の燃料を調達することとしている。

（５）(財)電力中央研究所

(財)電力中央研究所は我が国の高燃焼度化研究の基礎的部分を担っており、具体的には、大幅高燃焼度における燃料細粒化・リム組織形成の機構解明、ジルカロイ被覆管の高燃焼度時延性低下機構の解明、燃料の振舞いのモデル化等について研究を進めている。

また、(財)電力中央研究所では、同研究所主催で海外機関、国内電気事業者、国内燃料メーカー等が参加したHBRP (High Burnup Rim Project) 国際共同研究を進めているところである。

3.3 更なる高燃焼度化を進める際の留意事項

現在、電気事業者が実施し又は実施予定の燃料集合体最高燃焼度55,000MWd/tの照射データについては、基本的には、海外炉や国内少数体先行照射により得られているところではあるが、今後更なる高燃焼度の照射データ取得に当たっては以下の点に留意して研究開発を進めていくことが望ましい。

(1) 照射データ取得の長期化

高燃焼度領域まで照射された燃料の照射データを取得するためには、試験炉や商業炉において長期間照射する必要があり、高燃焼度化が進展するに従いその期間は更に長期化する。データ取得を必要とする高燃焼度領域まで照射し、その後PIEを実施するとなるとおよそ10年程度が必要となる。

このため、電気事業者においては、先行的に海外炉において照射計画を進めているが、規制側としても高燃焼度化の進展に遅れることなく安全規制に必要なデータを集積・整備する観点から研究を進めていく必要がある。

(2) 国内における照射データ取得

高燃焼度化燃料の開発に際して、現状では、海外における試験炉や商業炉において、高燃焼度化燃料に使用する予定のペレットや被覆管などについて、使用する燃焼度域をカバーするように照射試験を行い、主としてそこで得られた照射データをもとに高燃焼度化燃料に係る安全審査が行われている。また、高燃焼度化燃料を本格的に採用する前には、国内商業炉において少数体による先行照射が行われているが、その位置づけは、照射データを取得するというよりも、海外炉での照射データ等により、設計上、基本的な問題がないことが安全審査等で確認された燃料を照射し、その燃料の設計の妥当性について先行的に確認しようとするものである。

これまで、Halden炉を中心とした海外炉において高燃焼度化に係る有益な照射データが取得され、我が国の燃料の安全確保に大きく寄与してきており、今後も引き続き、高燃焼度化燃料等の研究・開発に当たり、OEC DプロジェクトとしてのHalden炉等、海外炉を積極的に活用していくことが重要である。また同時に国内においても、燃料

材料の基礎的な研究開発、商業炉で照射した燃料の燃焼度延伸のための追加照射や出力急昇試験等で、日本原子力研究所等の試験炉を積極的に活用することも重要である。

一方、国内の商業炉において許認可を受けている燃焼度を超える照射データを取得することについて、原子炉の水質環境や照射条件等の点から照射データを取得できる環境が整備されることが望ましい。米国では、照射データ取得のための先行照射燃料を商業炉に装荷する際には極端に厳しくない条件で使用することを条件に認めている^[25]が、正確な評価を行うためにはその条件を見直す必要性を認識しており、そのためのガイドラインが検討されている。

我が国においても、今後燃料の更なる高燃焼度化が図られていくことを考えれば、以上の状況を踏まえつつ、国内における燃料照射データ取得方法がいかにあるべきかについて検討を進めていくことが、長期的な燃料安全を確保していく上で重要である。

4．おわりに

今回、先の「高燃焼度化検討会」での検討結果を踏まえ、高燃焼度域での炉内照射試験データ等を評価した結果、改良被覆管や高濃度ガドリニア入り二酸化ウラン燃料を使用したステップ2燃料を本格採用することについて基本的に問題はないものと考えられる。今後、PWRを有する電気事業者においては、ステップ2燃料の装荷の手続が順次進められていくものと思われる。

本年6月にとりまとめられた総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会報告にもあるように、国が実施する安全基盤研究は、重点的・効率的に進めなければならず、軽水炉分野では、高経年化対策と並んで事故時の燃料挙動研究への重点化が必要であるとされている。

燃料の高燃焼度化に関して研究を進めている各機関のうち、(財)電力中央研究所は高燃焼度研究の基礎的部分を担っているが、電気事業者は更なる高燃焼度化を進めるに当たって許認可上必要となるデータ取得を中心に研究を進めており、(財)原子力発電技術機構、日本原子力研究所は国の安全規制上必要となるデータ取得を中心に研究を進めてきている。

今後はこれら機関が効果的に燃料研究を進められるよう、研究テーマの重点化や各機関の役割分担の明確化、燃料照射データ取得方法などについても更に検討を進めていくことが望ましく、原子炉安全小委員会においても必要な提言を行っていく。

5 . 調査審議の経緯

燃料WGでは、PWR燃料の高燃焼度化（ステップ2）及び燃料の高燃焼度化に係る安全研究の現状と今後の課題について、平成13年4月24日より9月11日まで合計4回の会合を開催し、検討を行った。また、原子炉安全小委員会では、平成13年10月16日から12月7日まで計2回の会合を開催し、検討を行った。

原子炉安全小委員会委員名簿（五十音順、敬称略）

委員長	斑目 春樹	東京大学大学院工学系研究科教授
	青山 博之	東京大学名誉教授
	朝田 泰英	(社)火力原子力発電技術協会技術顧問
	阿部 勝征	東京大学地震研究所教授
	石川 迪夫	(財)原子力発電技術機構特別顧問
	石塚 信	(財)原子力安全技術センター客員研究員
	石野 稔	東海大学工学部教授
	大橋 弘忠	東京大学大学院工学系研究科教授
	岡 芳明	東京大学大学院工学系研究科教授
	川上 泰	(財)原子力研究バックエンド推進センター専務理事
	近藤 駿介	東京大学大学院工学系研究科教授
	斯波 正誼	(財)原子力発電技術機構特別顧問
	辻川 茂男	東京大学名誉教授
	宮崎 慶次	滋賀職業能力開発短期大学校校長
	吉川 榮和	京都大学大学院エネルギー科学研究科教授

燃料WG委員名簿（五十音順、敬称略）

主査	石野 稔	東海大学工学部教授
	岩田 修一	東京大学人工物工学研究センター教授
	上塚 寛	日本原子力研究所東海研究所 原子炉安全工学部燃料安全研究室長
	大橋 弘士	北海道大学名誉教授
	木下 幹康	(財)電力中央研究所狛江研究所原子力システム部上席研究員
	杉原 淳	湘南工科大学材料工学科教授
	寺井 隆幸	東京大学大学院工学系研究科教授
	長井 修一郎	核燃料サイクル開発機構東海事業所 プルトニウム燃料センター技術主席
	古田 照夫	(財)原子力発電技術機構原子力安全解析所調査役
	三島 嘉一郎	京都大学原子炉実験所教授

表 2.1-1 ステップ 2 燃料に係る照射データの拡充状況

(三菱)


照射プラント ¹	運転照射条件			燃料仕様		取得データ項目 ²												
						改良被覆管 ³ [MDA/ZIRLO]						高濃度ガドリウム入り 二酸化ウラン ⁴ レット			大粒径 ⁴ レット			
	冷却材入口 温度 (°C)	冷却材圧力 (MPa[gage])	平均線出力 (\bar{L} -線出力) (kW/m) (~約39)	燃料型式	初期加圧量 (MPa[gage])	腐食	水素 吸収	機械 特性	疲労 特性	燃料棒 外径	燃料棒 伸び	P C I	密度	FPガス 放出率	P C I	密度	FPガス 放出率	P C I
BR3	約255	約14.2	(~約39)	14 × 14	1.4	(63R)	(63R)	(71P)	-	(14R) (63R)	(63R)	-	-	-	-	-	-	-
NorthAnna1	約289	約15.5	18.6	17 × 17	1.9~2.4	(40R) (55R)	-	-	-	(23R) (55R)	(40R) (55R)	-	-	-	-	-	-	-
Vandellos2	約292	約15.4	17.9	17 × 17	2.2~2.3	(57R)	(56R)	(56P)	(56P)	(60R)	(57R)	(60P)	-	-	-	(56P)	(60R)	(60P)
BR2	約293	約15.5	(約34)	17 × 17	1.4	(13R)	(14R)	(22P)	-	(16R)	(16R)	-	-	-	-	(24P)	(15R)	(24P)
BR3	約255	約14.2	(~約33)	17 × 17	1.4	-	-	-	-	-	-	-	(17P)	(12R)	(17P)	-	-	-
R2 (BR3から継続照射)	約100 ⁴	約14.7	(~約30)	17 × 17	1.4	-	-	-	-	-	-	-	(61P)	(37R)	-	-	-	-
Halden	約240	約3.4	(約36)	17 × 17	0.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(21R)	-

(原燃工)

照射プラント ¹	運転照射条件			燃料仕様		取得データ項目 ²												
						改良被覆管 [NDA]						高濃度ガドリウム入り 二酸化ウラン ⁴ レット			大粒径 ⁴ レット			
	冷却材入口 温度 (°C)	冷却材圧力 (MPa[gage])	平均線出力 (\bar{L} -線出力) (kW/m)	燃料型式	初期加圧量 (MPa[gage])	腐食	水素 吸収	機械 特性	疲労 特性	燃料棒 外径	燃料棒 伸び	P C I	密度	FPガス 放出率	P C I	密度	FPガス 放出率	P C I
McGuire1	約293	約15.4	17.8	17 × 17	2.2	(42R)	(42R)	(43P)	(45P)	(42R)	(42R)	(46P)	-	-	-	(45P)	(42R)	(46P)
R2 (McGuire1から継続照射)	約80 ⁴	約14.5	(約17~31)	17 × 17	3.2~3.3	(62R)	-	(63P)	-	(62R)	-	(65P)	-	-	-	-	(60R)	(64P)
BR2	約293	約15.5	(約25~40)	17 × 17	1.9	(19R)	(14R)	(23P)	-	(19R)	(19R)	(23P)	-	-	-	(23P)	(19R)	(23P)
Osiris (BR2から継続照射)	約250~	約15.4	(約30)	17 × 17	1.9	(27R)	-	-	-	(27R)	(27R)	-	-	-	-	-	-	-
Halden	約300	約16.2	(約26~37)	17 × 17	2.0	(52R)	(21R)	-	-	(52R)	(52R)	(55P)	-	-	-	(23P)	(21R)	(55P)
BR3	約255	約14.2	(~約35)	17 × 17	2.0	-	-	-	-	-	-	-	(19P)	(13R)	(19P)	-	-	-
R2 (BR3から継続照射)	約80 ⁴	約14.5	(約20~30)	17 × 17	2.0	-	-	-	-	-	-	-	(61P)	(40R)	-	-	-	-

*1 商業炉：BR3、NorthAnna1、Vandellos2、McGuire1

試験炉：BR2、Halden、R2、Osiris

*2 表中の括弧内は燃料棒平均燃焼度 (R) 及びペレット燃焼度 (P) の最高燃焼度 (GWd/t) を表す。また、 は「高燃焼度化検討会」以降の照射データであることを表す。

*3 MDAの照射プラント：NorthAnna1、Vandellos2、BR2

ZIRLOの照射プラント：NorthAnna1、Vandellos2、BR3

*4 被覆管表面温度が商業炉条件に相当するよう高出力にて照射。

表 2.2-1 PWR 高燃焼度燃料の標準仕様

項目	17×17型燃料(代表例)		
	現行燃料(ステップ1燃料)	ステップ2先行照射燃料	ステップ2燃料
(1)ペレット 種類	現行ペレット 〔二酸化ウラン焼結ペレット (一部ガドリウムを含む)〕	現行ペレット又は大粒径ペレット 〔同左〕	現行ペレット 〔同左〕
ウラン235濃縮度	約4.1wt% (ガドリウム入り燃料については約2.6wt%、ガドリウム濃度約6wt%)	約4.5wt% (ガドリウム入り燃料については約2.0wt%、ガドリウム濃度約10wt%)	約4.8wt% (ガドリウム入り燃料については約3.2wt%、ガドリウム濃度約10wt%)
初期密度	理論密度の約95%	同左	理論密度の約97% ^{*1} (ガドリウム入り燃料については約96%)
(2)被覆管 種類	ジルカドイ-4 (従来Sn/低Sn)	低Snジルカドイ-4又は ジルエム基合金 (MDA/NDA/ZIRLO) 集合組織調整あり、 なし混在 ^{*2}	ジルエム基合金 (MDA/NDA/ZIRLO) NDAについては集合 組織調整あり
(3)燃料要素			
燃料棒有効長さ	約3.7m	約3.6m又は約3.7m	約3.7m
燃料棒外径	約9.5mm	同左	同左
被覆管厚さ	約0.6mm	同左	同左
(4)燃料集合体			
燃料棒の配列	17×17	同左	同左
燃料棒ピッチ	約13mm	同左	同左
燃料集合体当たりの 燃料棒数	264	同左	同左
燃料集合体当たりの 制御棒案内シグナル数	24	同左	同左
燃料集合体当たりの 炉内計装用案内シグナル数	1	同左	同左
燃料集合体最高燃焼度	48,000MWd/t	55,000MWd/t	同左

*1 ペレット初期密度の増加については、BWRでは高燃焼度8×8燃料集合体(ステップ2燃料)より約95%理論密度から約97%理論密度への増加を実施済み。PWRではステップ2燃料の本格実用化に際する燃料仕様変更に伴って併せて実施する。

*2 集合組織調整(RT; Radial Texture)あり: MDA,NDA,ZIRLO,低Snジルカドイ-4

〃 なし: NDA,ZIRLO,低Snジルカドイ-4

表 2.3-1 被覆管の合金成分^{[4],[26]}

被覆管		合金成分 ^{*1} [wt%]				
		Sn	Fe	Cr	Nb	Ni
ジルコニウム 基合金	MDA	0.8	0.2	0.1	0.5	-
	NDA	1.0	0.27	0.16	0.10	0.01
	ZIRLO	1.0	0.1	-	1.0	-
従来Sn [*] ジルカロイ-4 ^{*2}		約1.5 ^{*3}	約0.2	約0.1	-	-
低Sn [*] ジルカロイ-4 ^{*2}		約1.3 ^{*3}				

*1 残りはジルコニウム。

*2 ジルカロイ-4のうち、規格内でSn含有量を少なくしたものを「低Snジルカロイ-4」、それ以外を「従来Snジルカロイ-4」と呼ぶ。

*3 ジルカロイ-4の規格値は1.2～1.7。

注．図表中の[]内の数字は、該当データを引用した参考文献の番号を示す（以下、同様）。

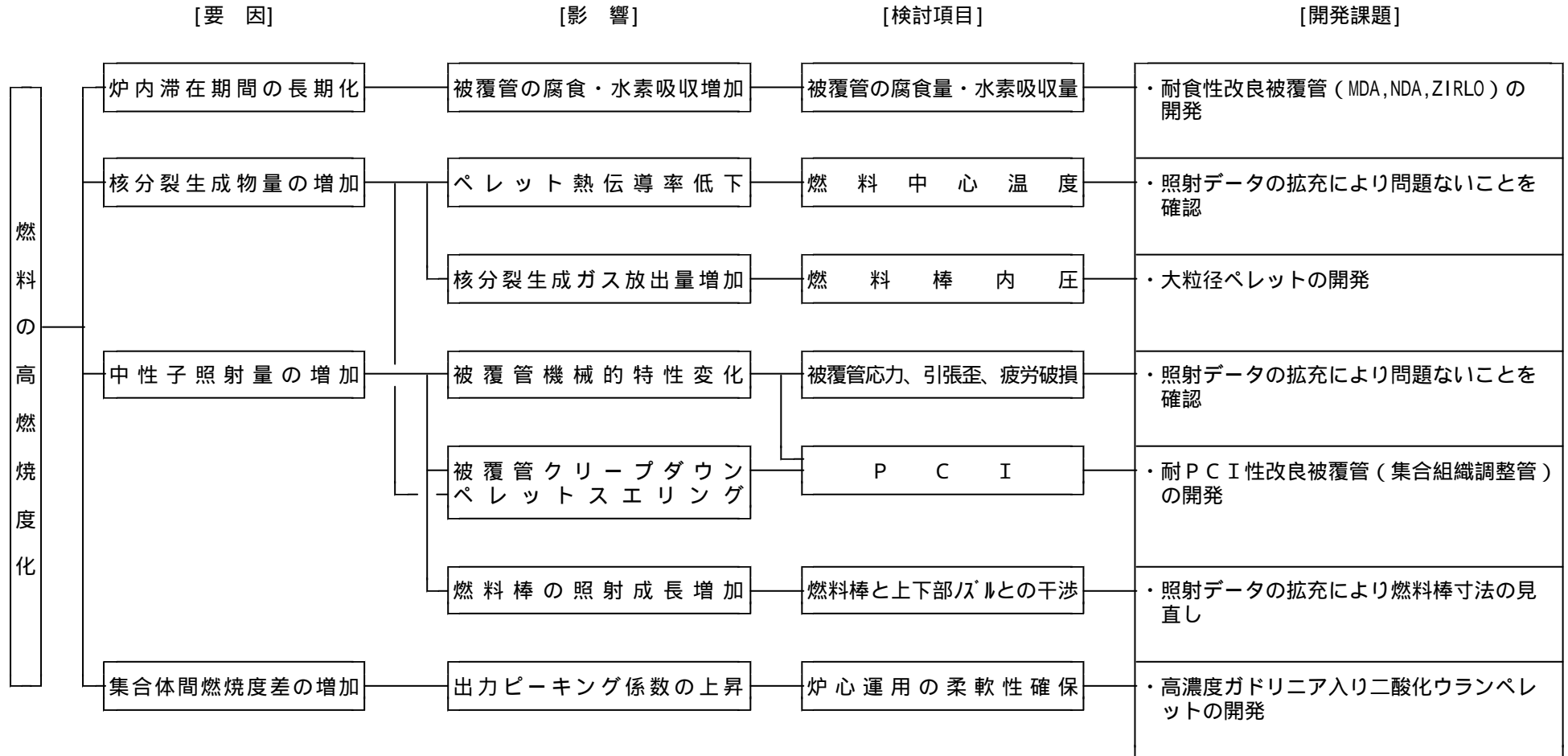
表 2.3-2 改良被覆管の溶融点及び密度 (三菱) ^[27]

被覆管	溶融点測定結果 []	密度測定結果 [g/cm ³]
ジルカロイ-4	1 8 2 5	6.53
MDA	1 8 4 4	6.52
ZIRLO	1 8 4 2	6.54

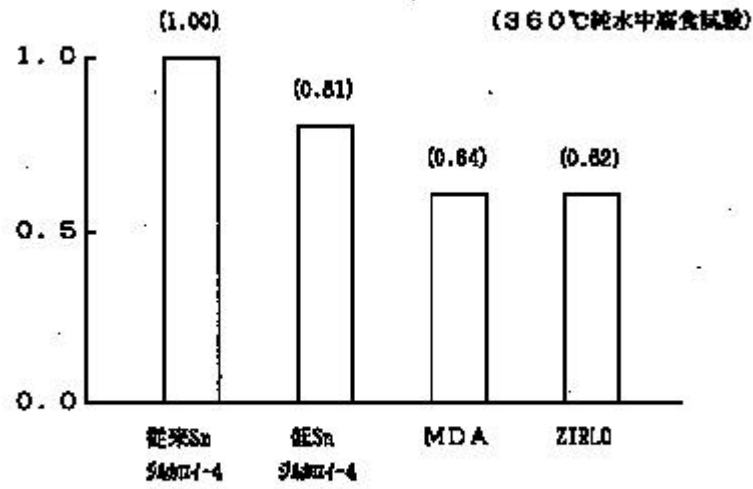
表 2.3-3 改良被覆管の溶融点及び密度 (原燃工) ^[4]

被覆管	溶融点測定結果 []	密度測定結果 [g/cm ³]
ジルカロイ-4	1 7 8 2	6.52
NDA	1 7 9 6	6.52

図 2.1-1 PWR 燃料の高燃焼度化に伴う影響と開発課題



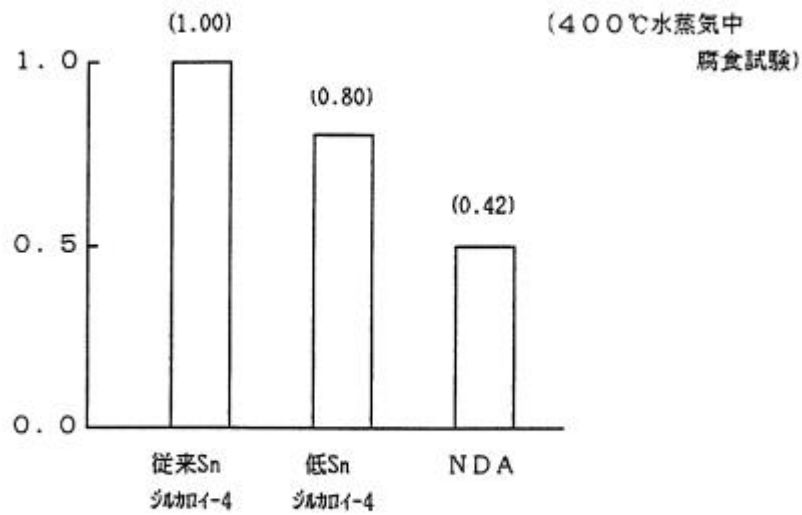
腐食速度の相対値*



*従来Snジルカロイ-4の腐食速度を1.0とした場合の各被覆管材の腐食速度（180～780日間）の相対値。

図 2.3-1 炉外腐食試験における改良被覆管の腐食特性（三菱）^[26]

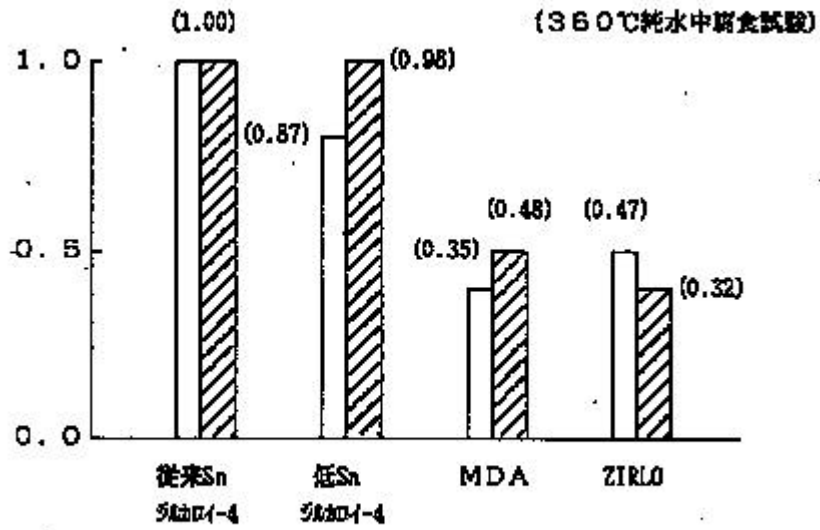
腐食速度の相対値*



*従来Snジルカロイ-4の腐食速度を1.0とした場合の各被覆管タイプの腐食速度（120～480日間）の相対値。

図 2.3-2 炉外腐食試験における改良被覆管の腐食特性（原燃工）^[28]

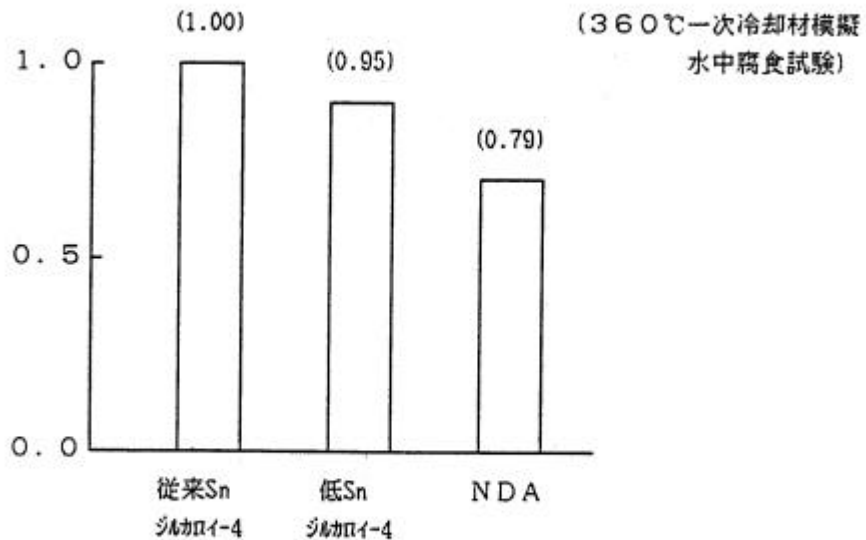
水素吸収率の相対値^a



※従来Sn ジルカロイ-4の水素吸収率を1.0とした場合の各被覆管材の水素吸収率（左：200日後、右：450日後）の相対値。

図 2.3-3 炉外腐食試験における改良被覆管の水素吸収特性（三菱）^[27]

水素吸収率の相対値^a



※従来Sn ジルカロイ-4の水素吸収率を1.0とした場合の各被覆管タイプの水素吸収率（180日後）の相対値。

図 2.3-4 炉外腐食試験における改良被覆管の水素吸収特性（原燃工）^[28]

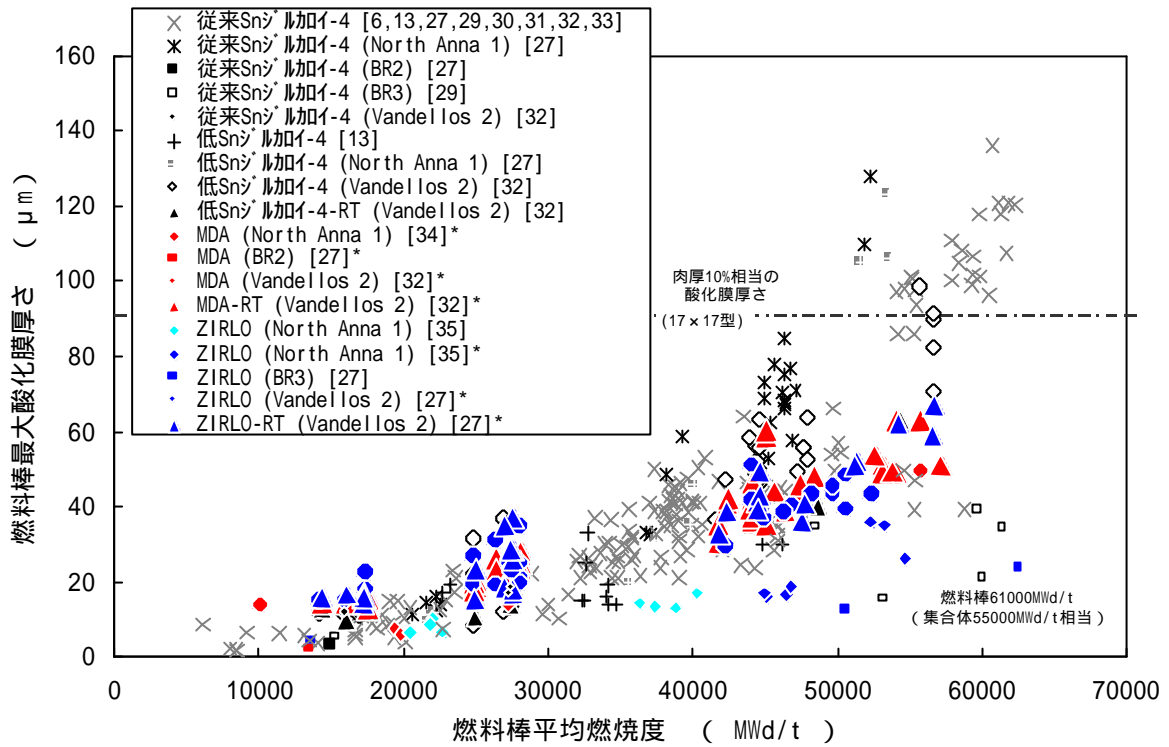


図 2.3-5 改良被覆管の炉内酸化膜厚さ (三菱)

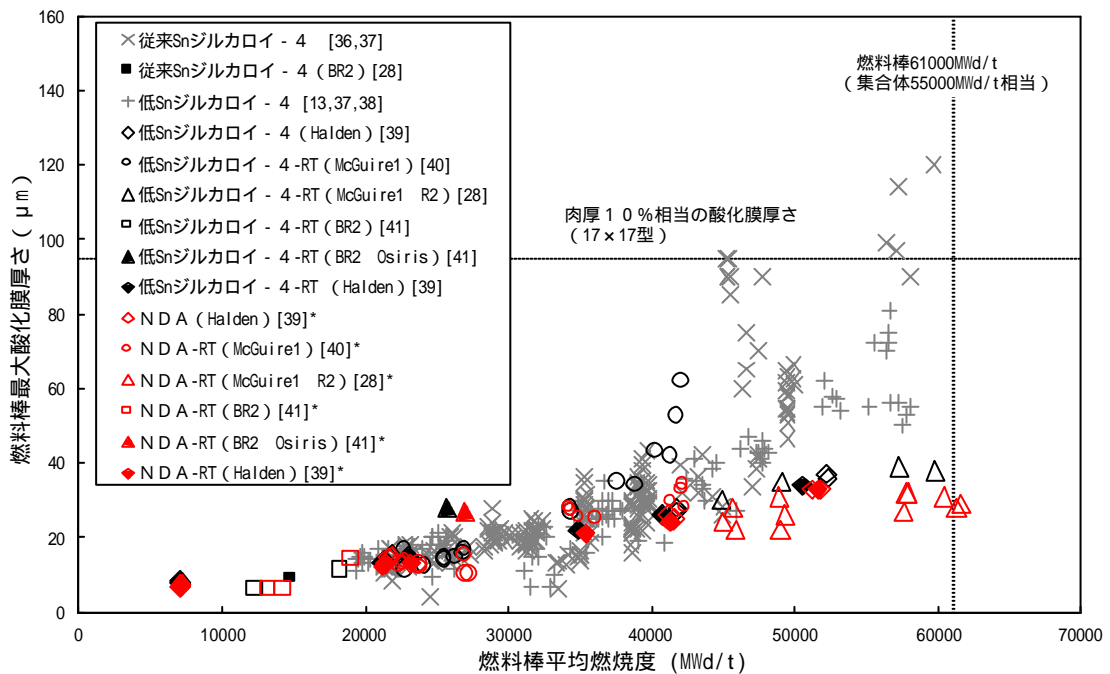


図 2.3-6 改良被覆管の炉内酸化膜厚さ (原燃工)

注. *を付けた改良被覆管の照射データは「高燃焼度化検討会」以降のものである(以下、同様)。

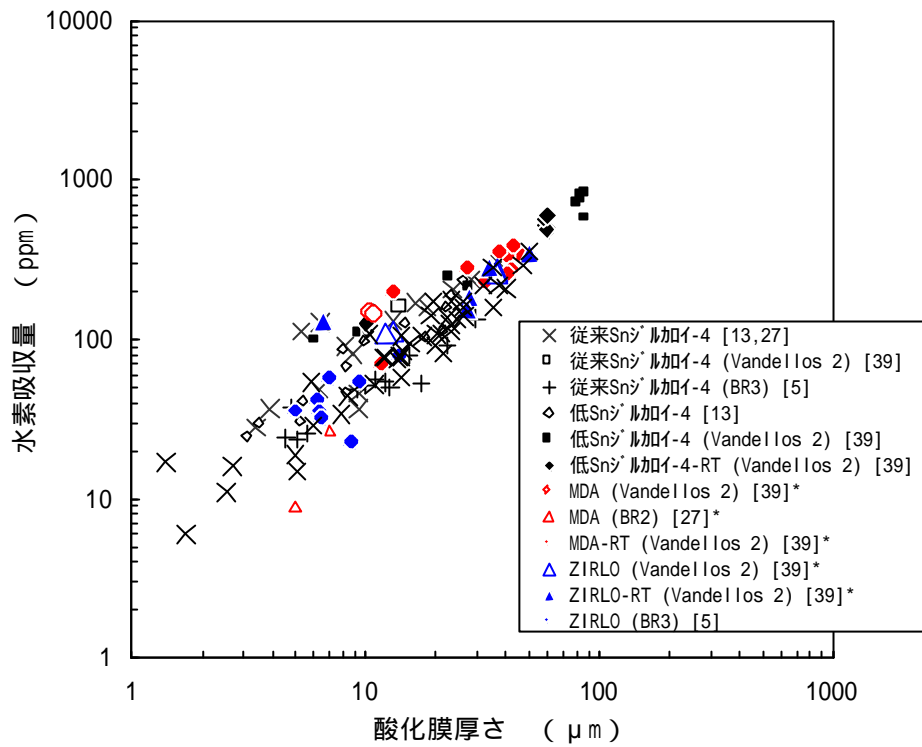


図 2.3-7 改良被覆管の炉内酸化膜厚さと水素吸収量の関係 (三菱)

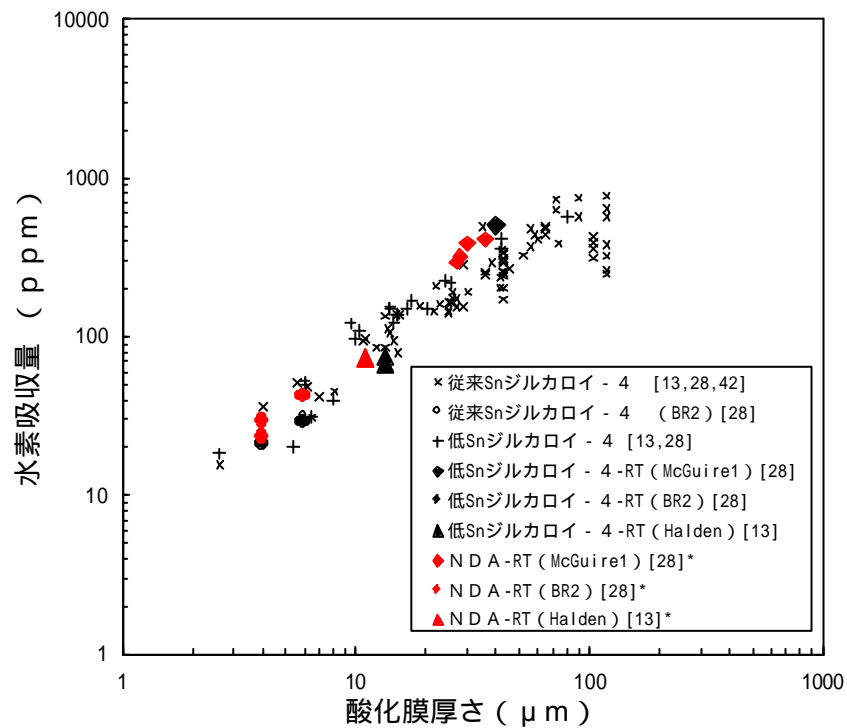


図 2.3-8 改良被覆管の炉内酸化膜厚さと水素吸収量の関係 (原燃工)

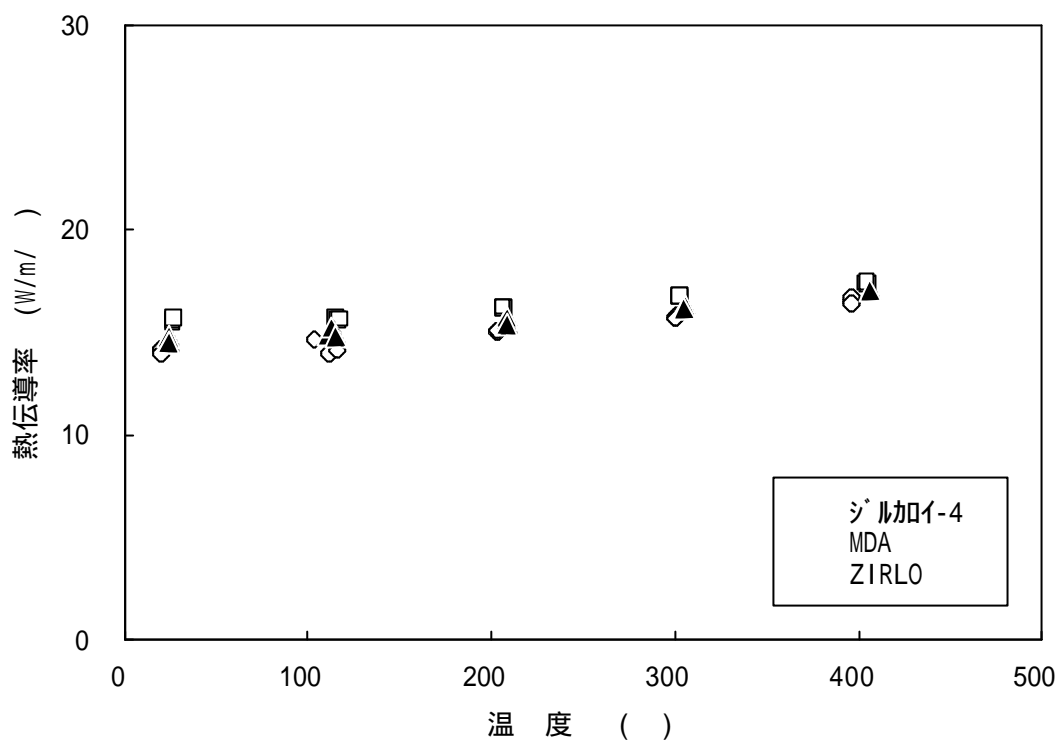


図 2.3-9 改良被覆管の熱伝導率 (三菱) ^[27]

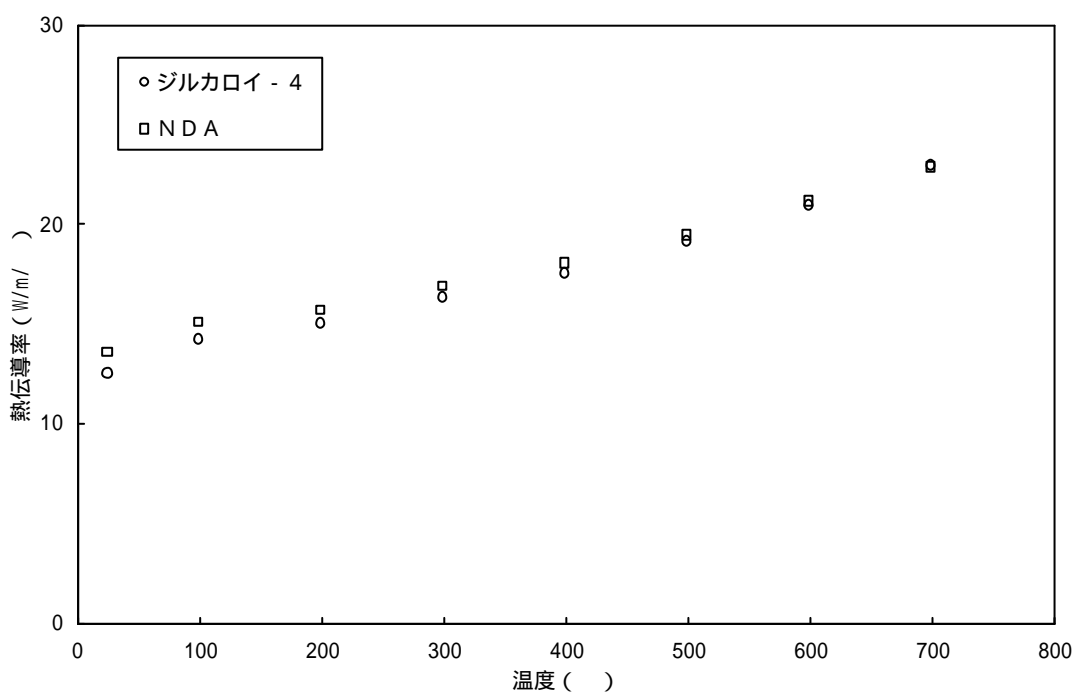


図 2.3-10 改良被覆管の熱伝導率 (原燃工) ^[4]

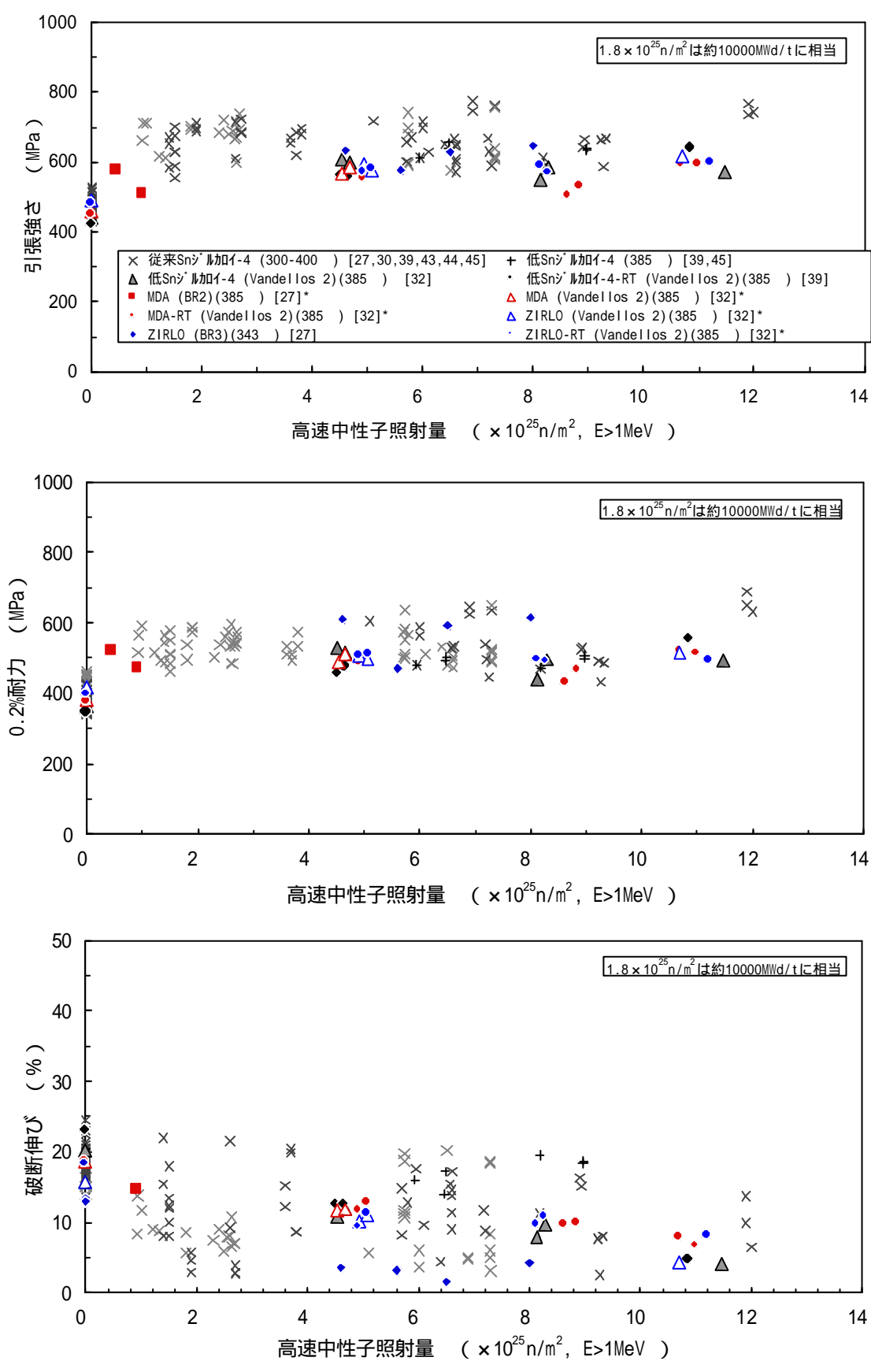


図 2.3-11 改良被覆管の機械特性 (三菱)

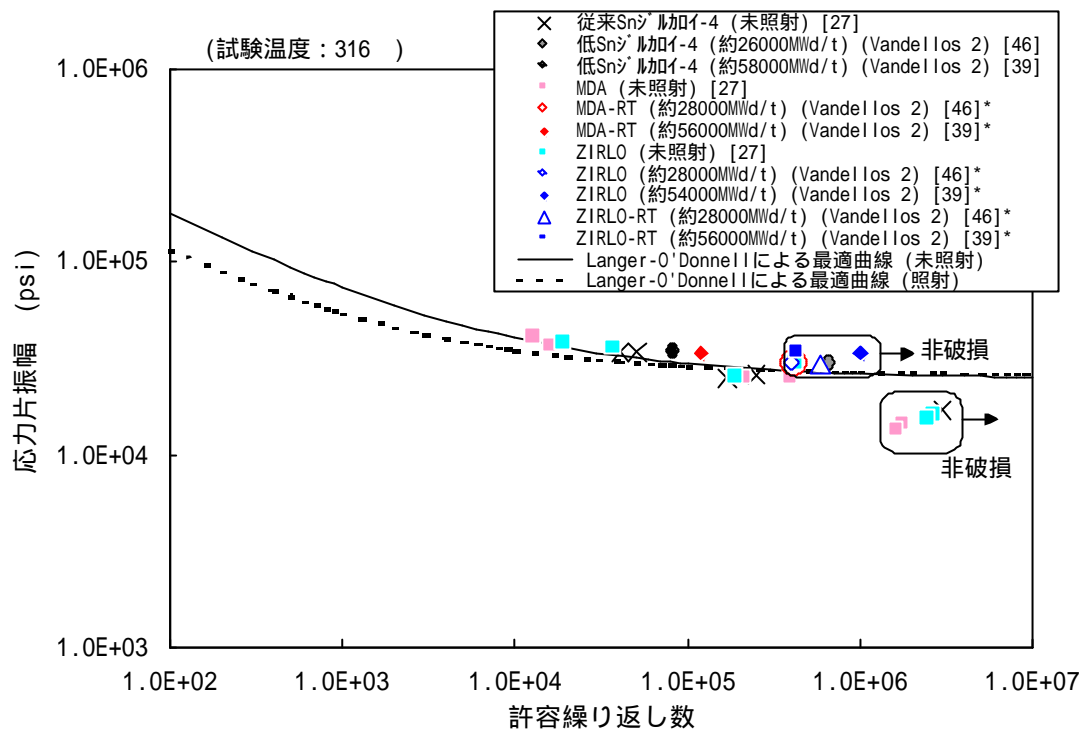


図 2.3-12 改良被覆管の疲労強度 (三菱)

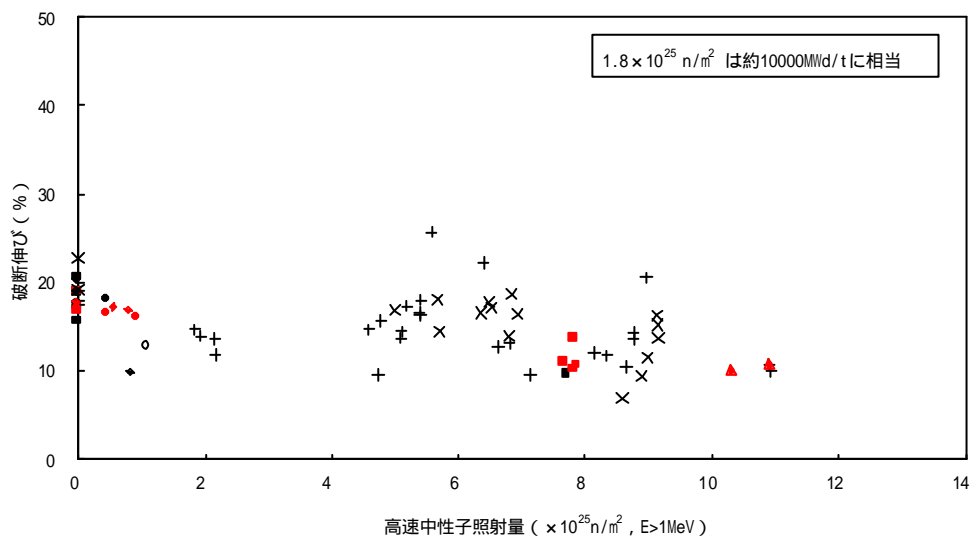
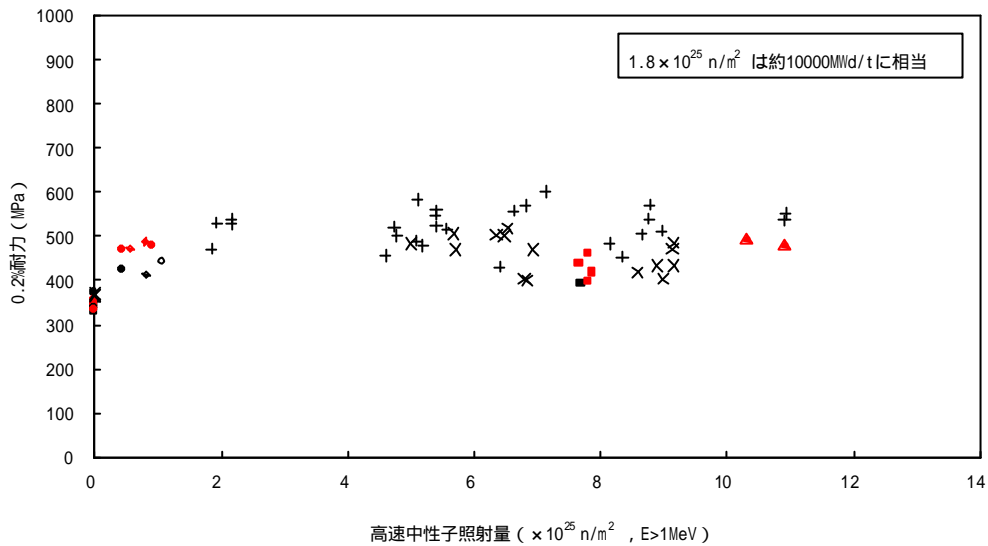
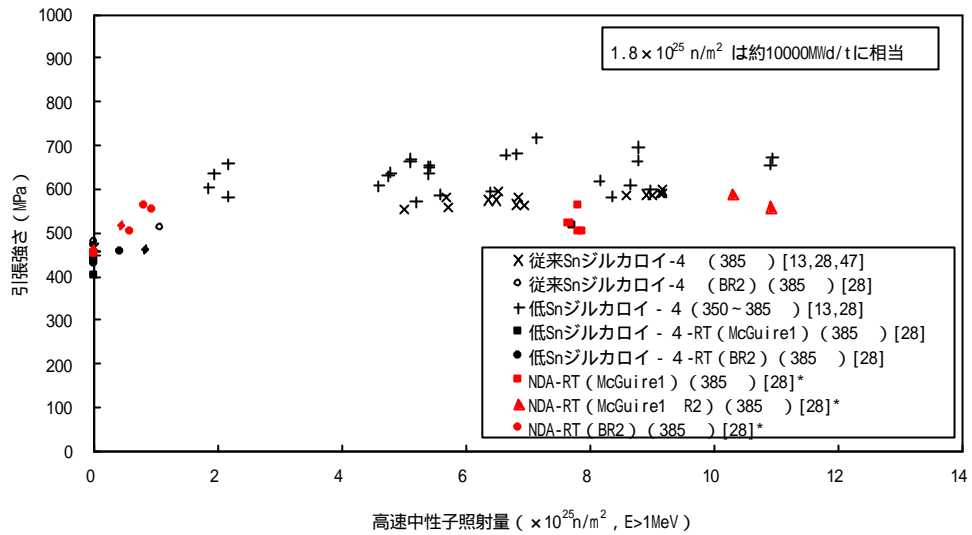


図 2.3-13 改良被覆管の機械特性 (原燃工)

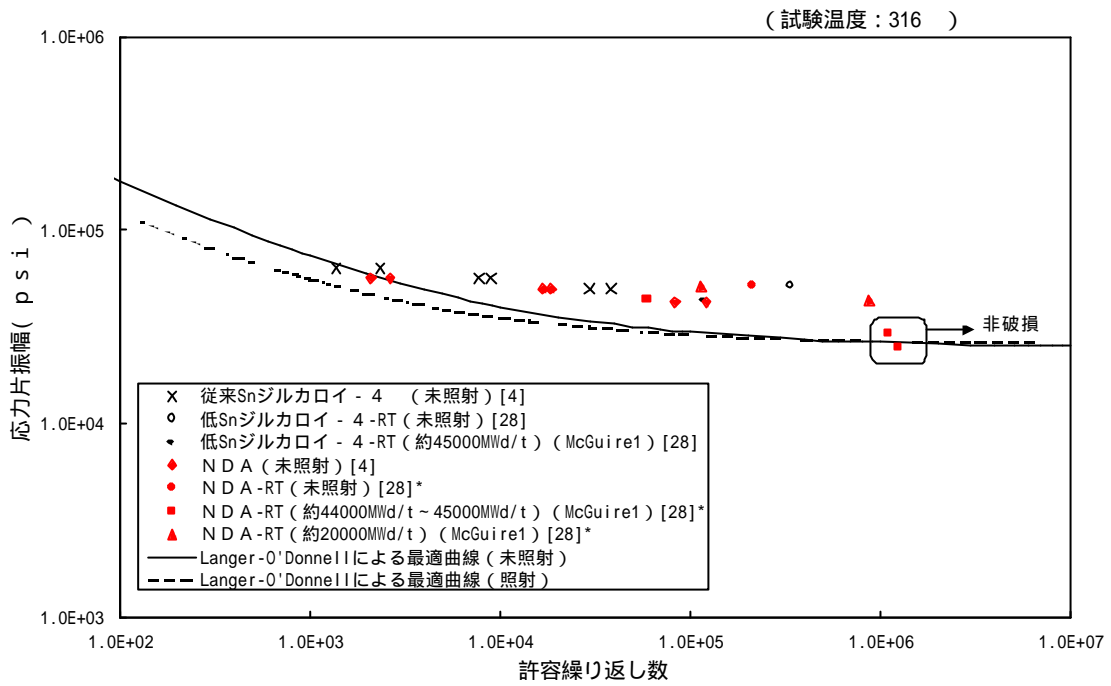


図 2.3 - 14 改良被覆管の疲労強度 (原燃工)

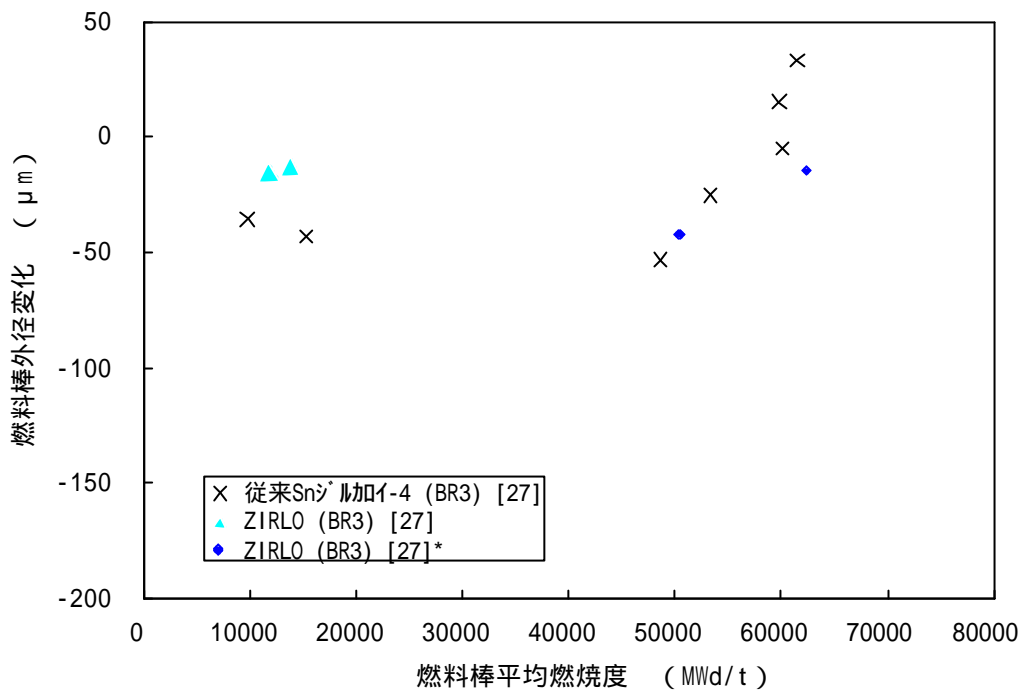


図 2.3-15 (1) 改良被覆管の外径変化 [BR3炉] (三菱)

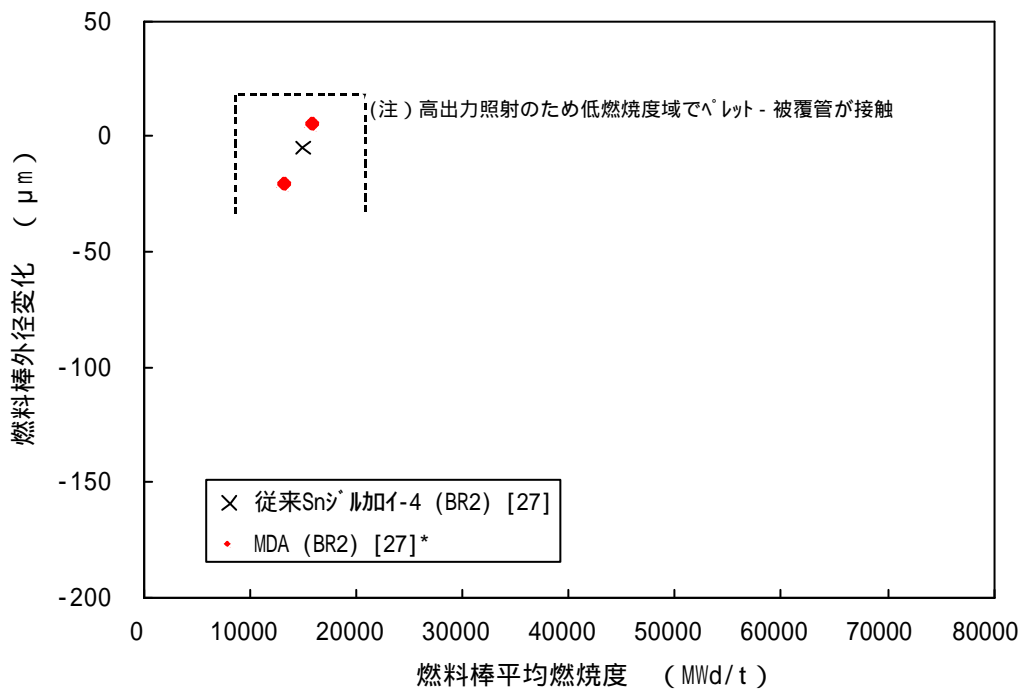


図 2.3-15 (2) 改良被覆管の外径変化 [BR2炉] (三菱)

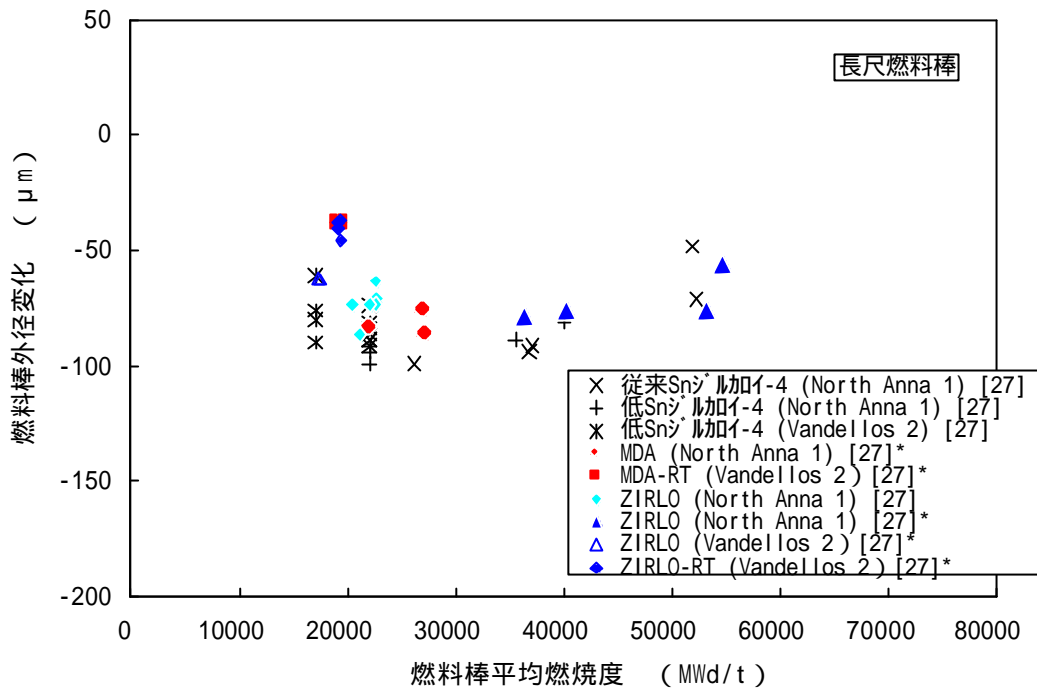


図 2.3-15 (3) 改良被覆管の外径変化 [NorthAnna1号炉, Vandell os2号炉]
(三菱)

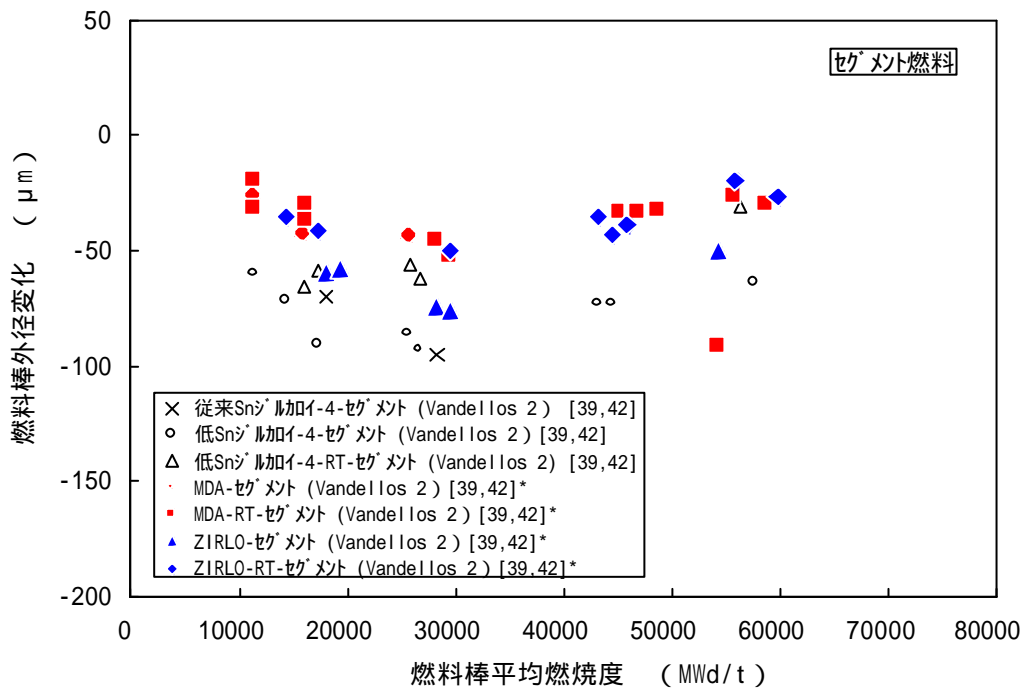


図 2.3-15 (4) 改良被覆管の外径変化 [Vandell os2号炉] (三菱)

注 . Vandell os2号炉の照射試験では、通常の長尺燃料棒及び7つのセグメント燃料から構成される燃料棒を照射している。

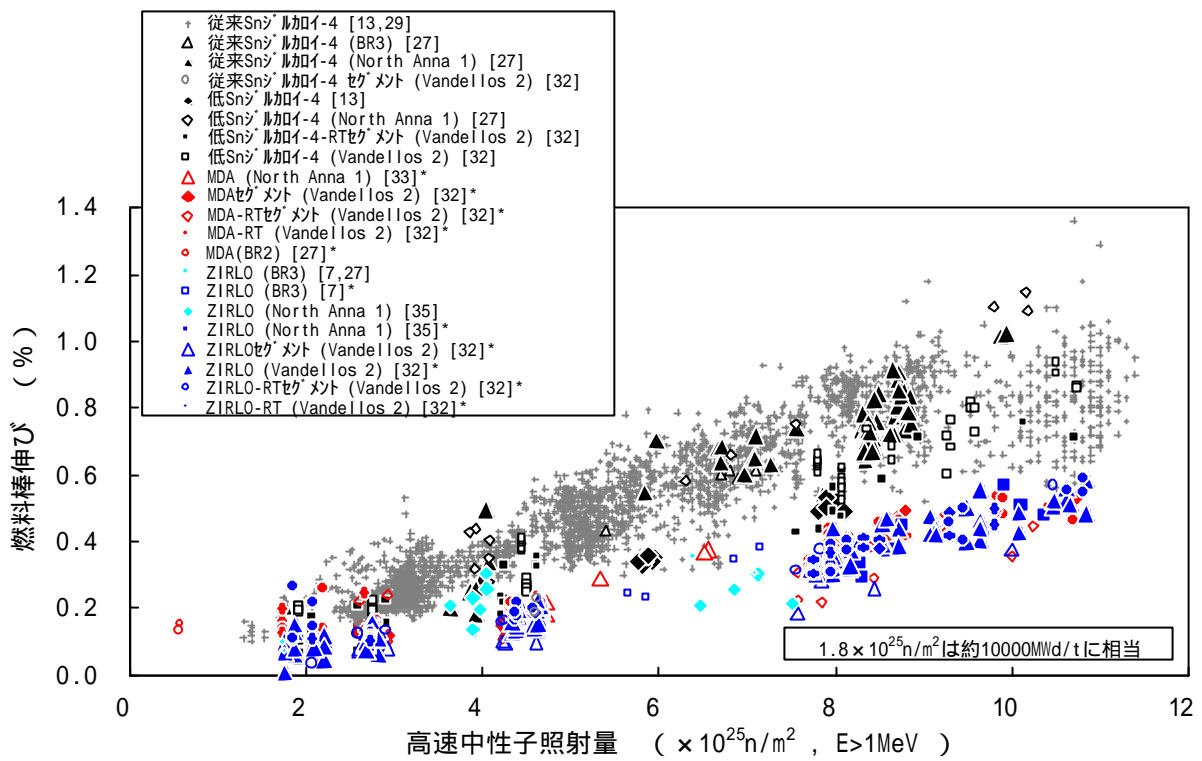


図 2.3-16 改良被覆管の照射成長 (三菱)

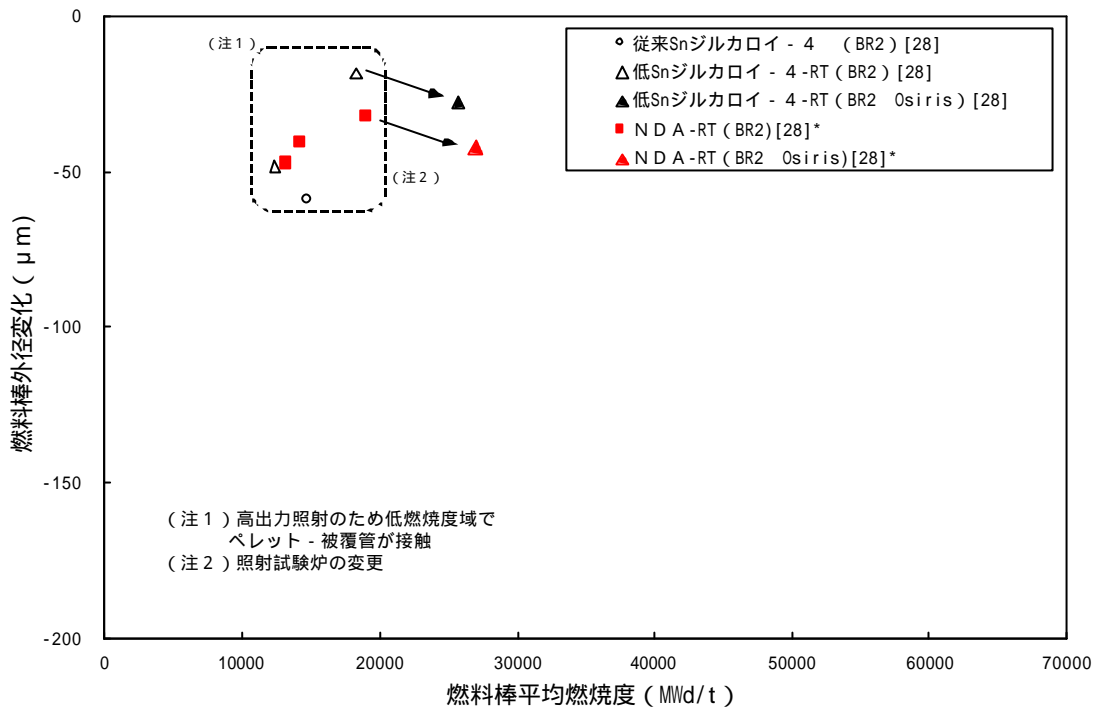


図 2.3 - 1 7 (1) 改良被覆管の外径変化 [BR2炉] (原燃工)

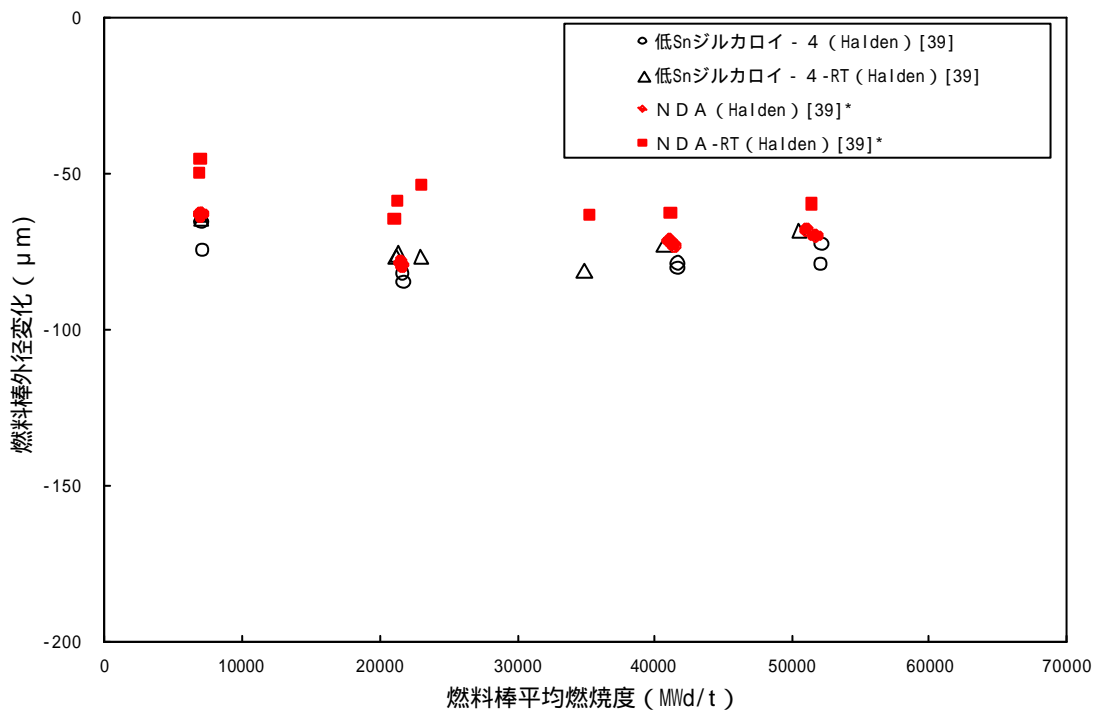


図 2.3 - 1 7 (2) 改良被覆管の外径変化 [Halden炉] (原燃工)

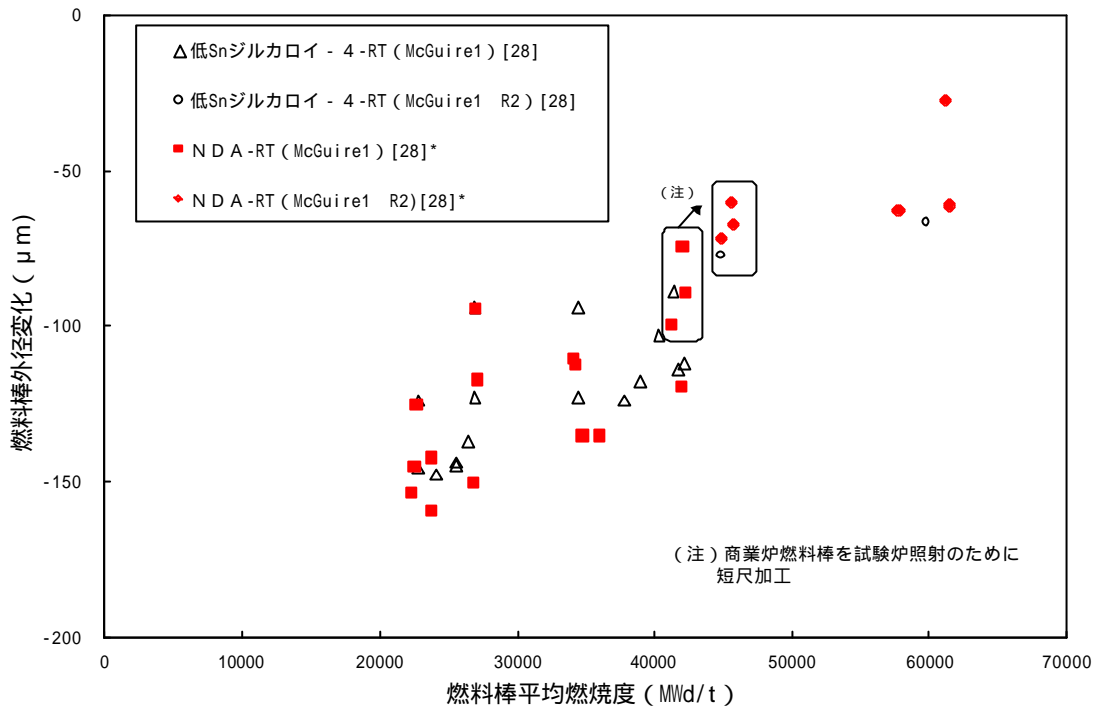


図 2.3 - 1 7 (3) 改良被覆管の外径変化 [McGuire1号炉, McGuire1号炉 R2炉]
(原燃工)

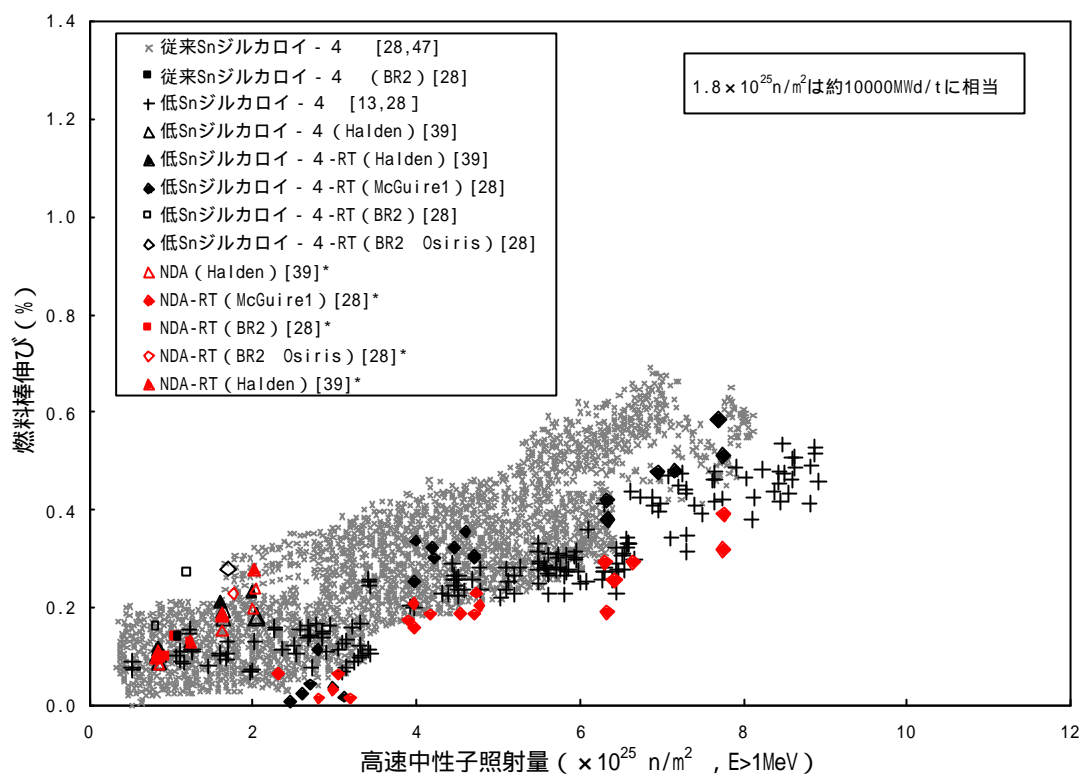


図 2.3 - 1 8 改良被覆管の照射成長 (原燃工)

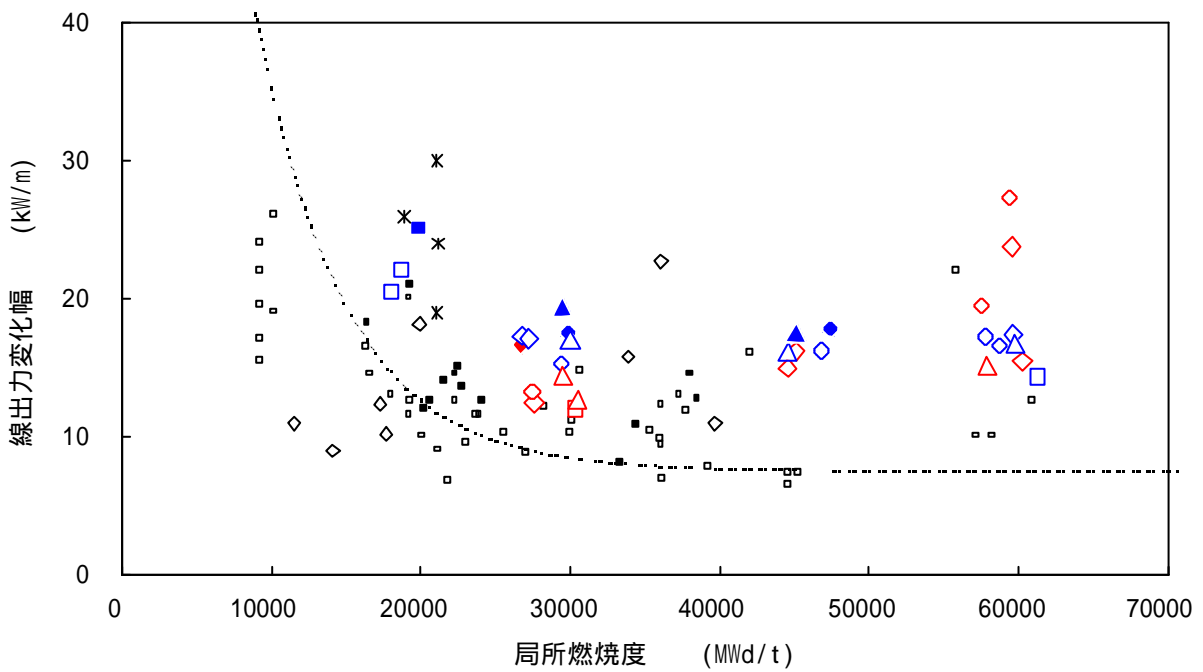
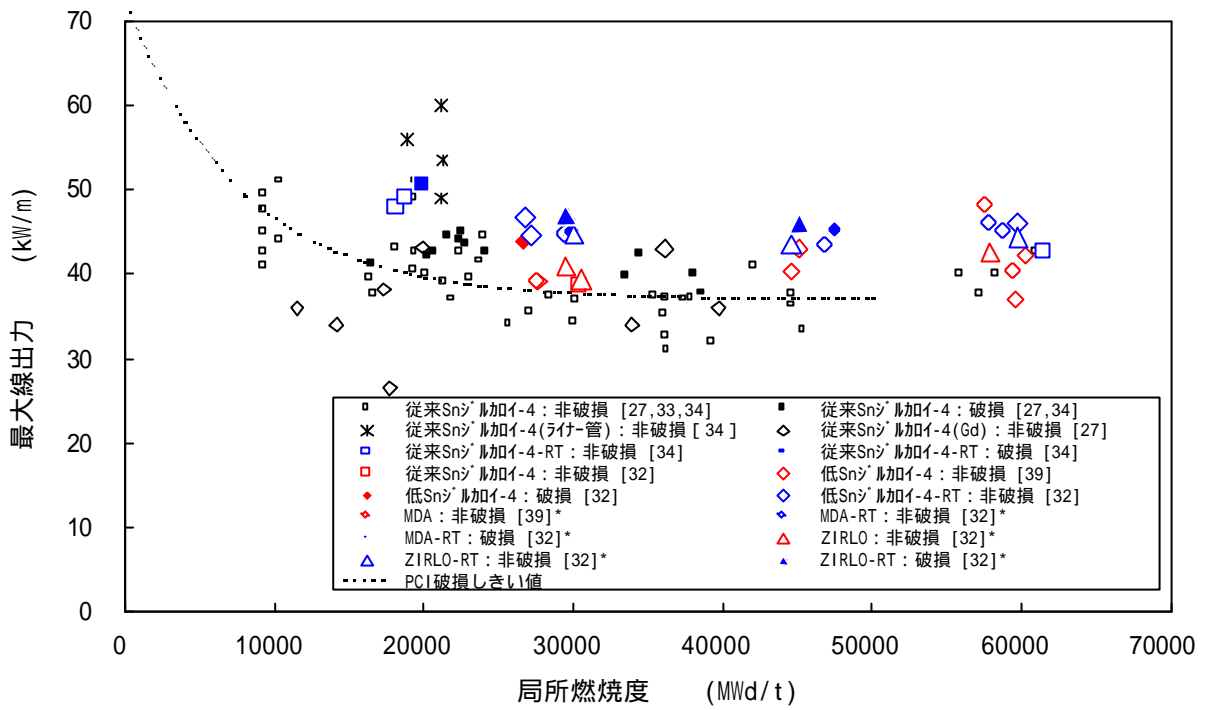


図2.3-19 改良被覆管の耐PCI性(三菱)

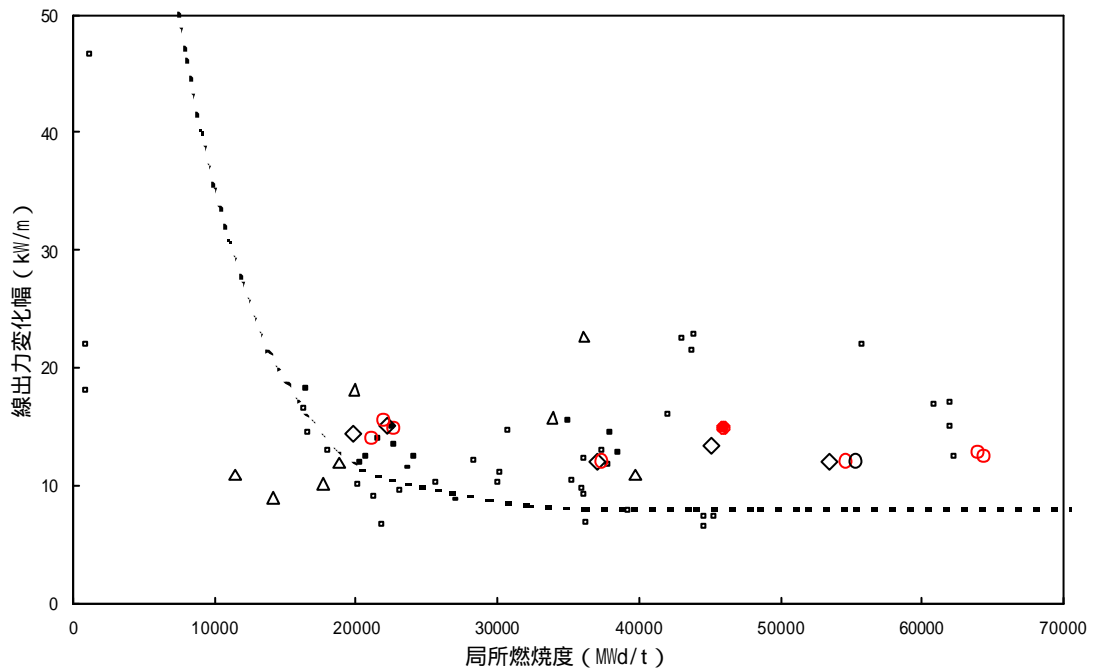
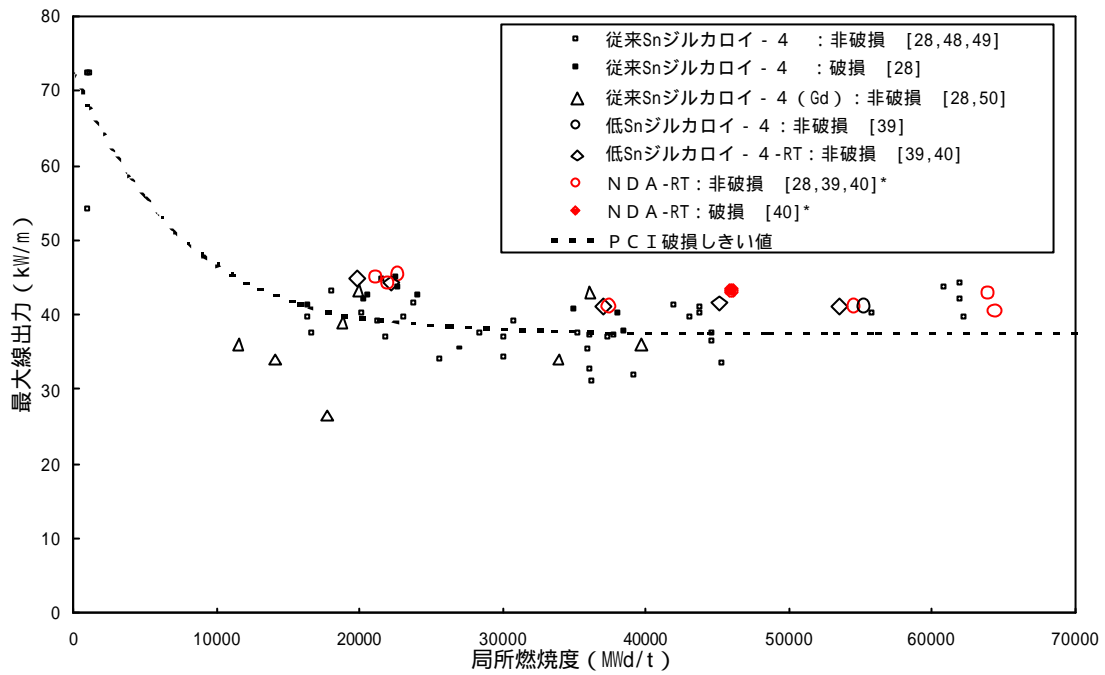


図 2.3-20 改良被覆管の耐 P C I 性 (原燃工)

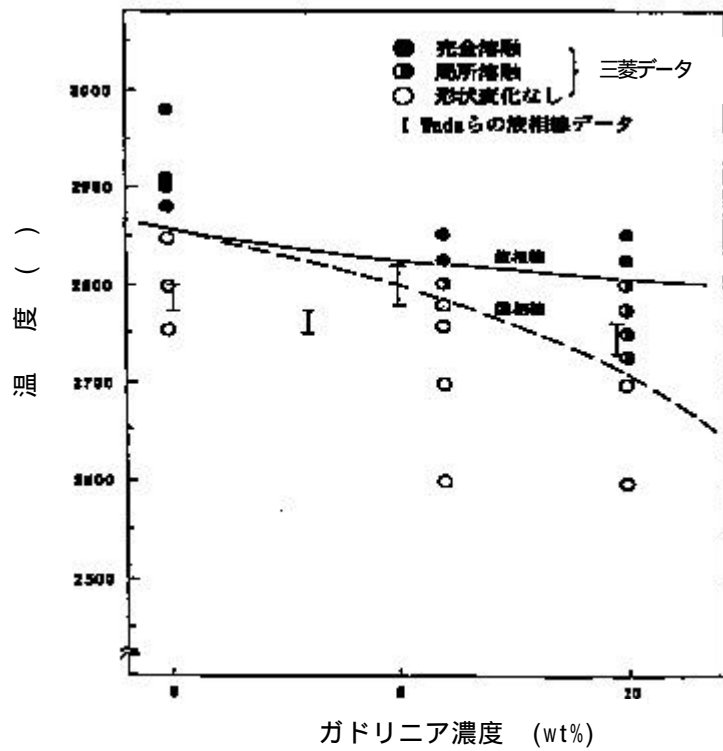


図 2.4-1 高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの溶融点 (三菱) ^{[51],[52]}

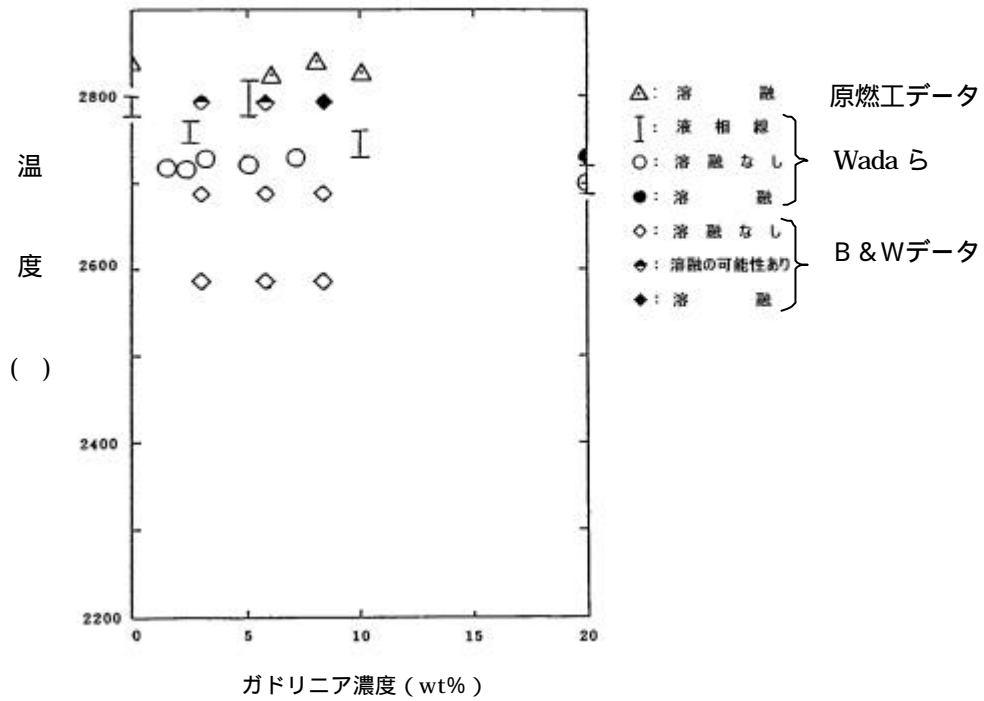


図 2.4-2 高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの溶融点 (原燃工) ^[4]

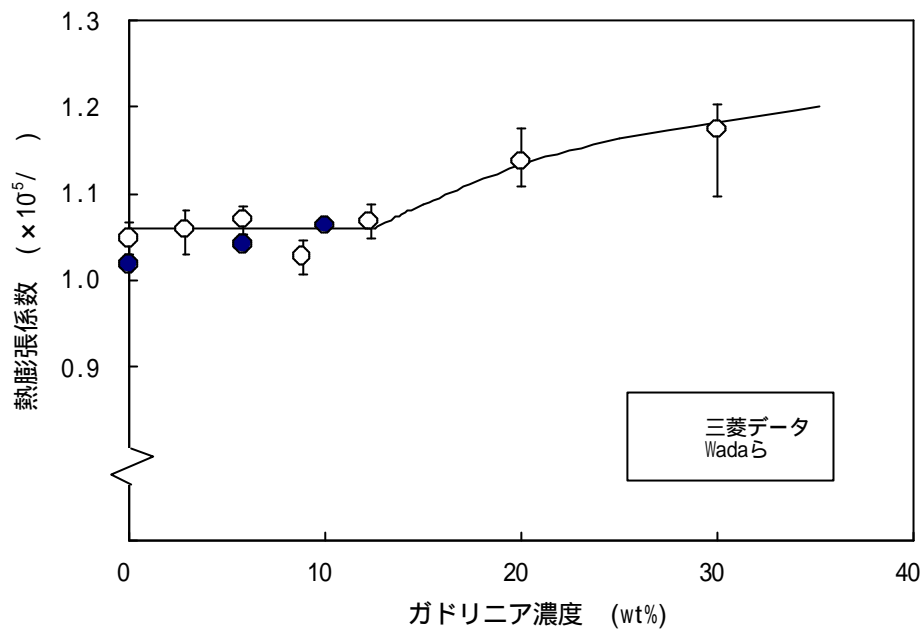


図 2.4-3 高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの熱膨張係数
(三菱) [52], [53]

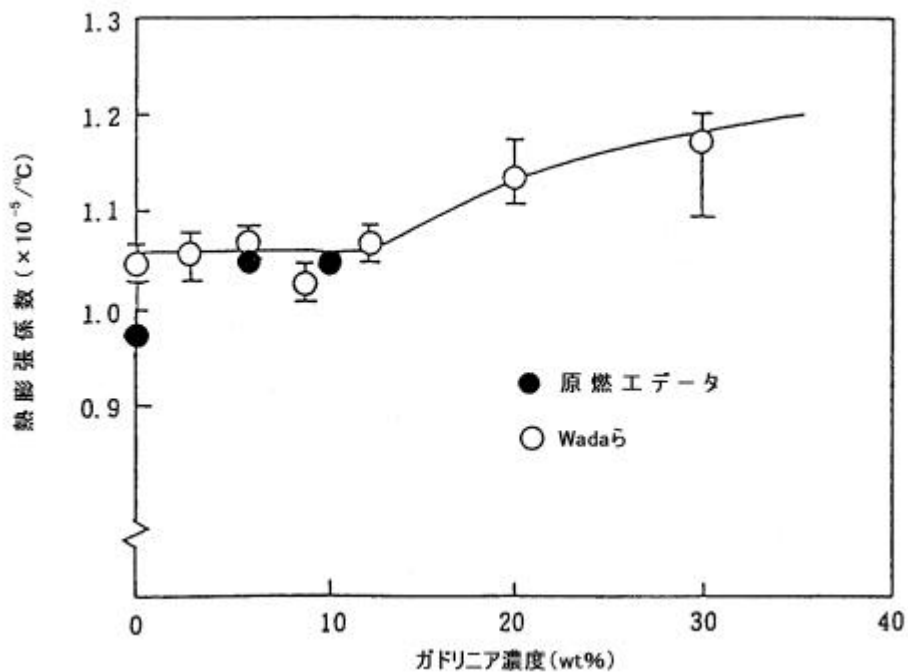


図 2.4-4 高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの熱膨張係数 (原燃工) [4]

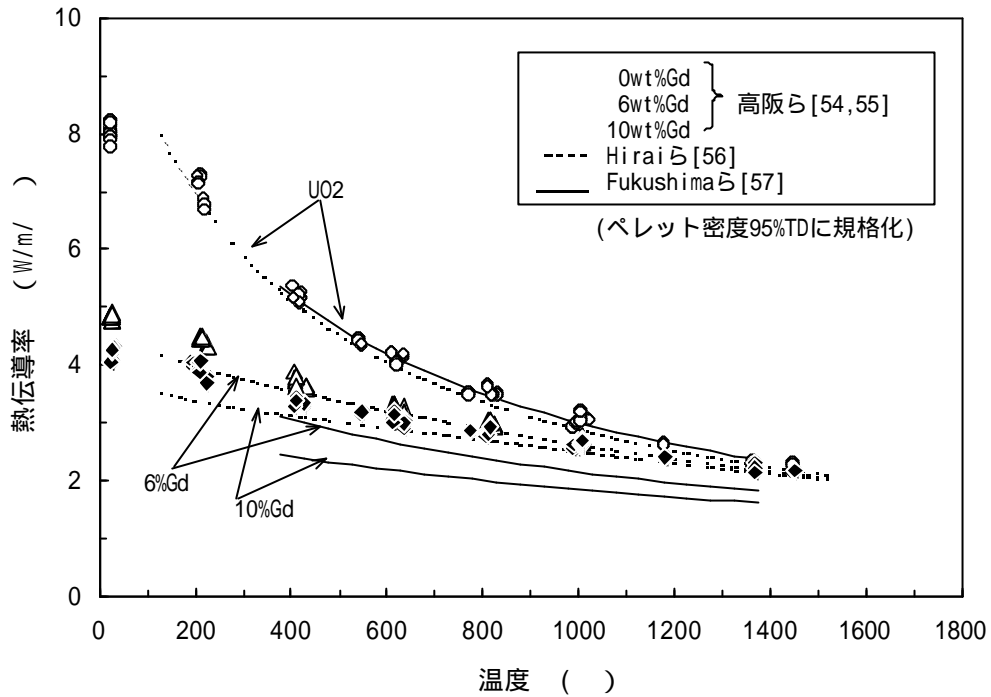


図 2.4-5 高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの熱伝導率（三菱）

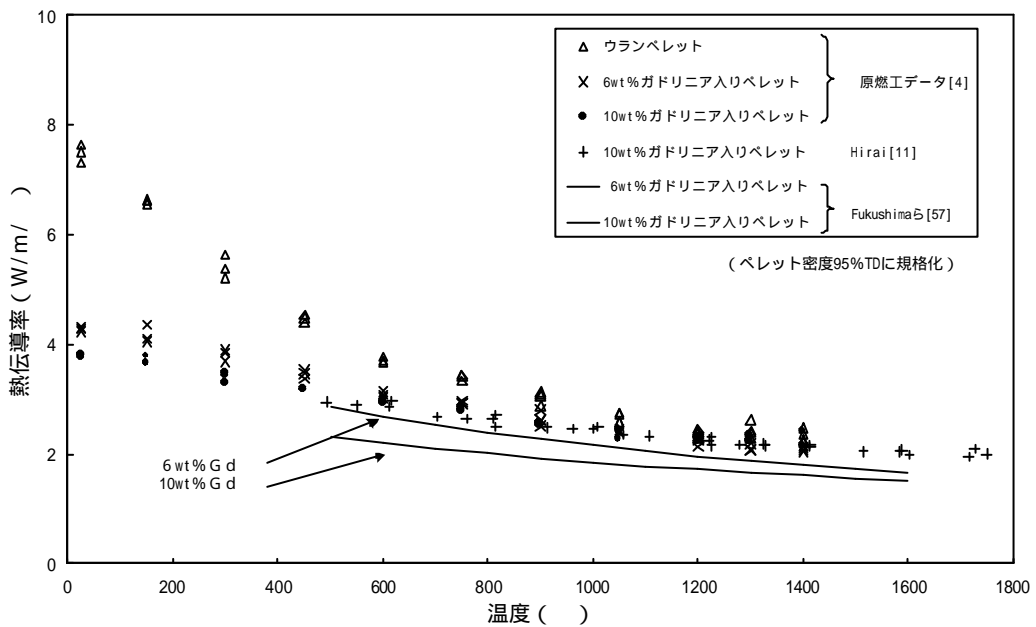


図 2.4-6 高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの熱伝導率（原燃工）

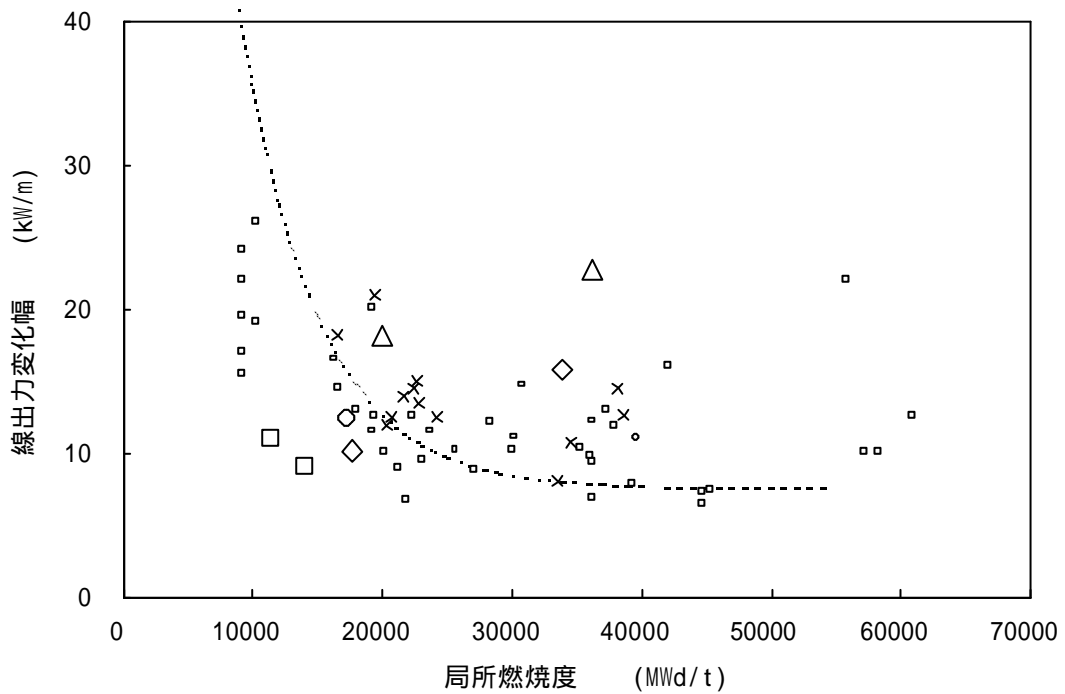
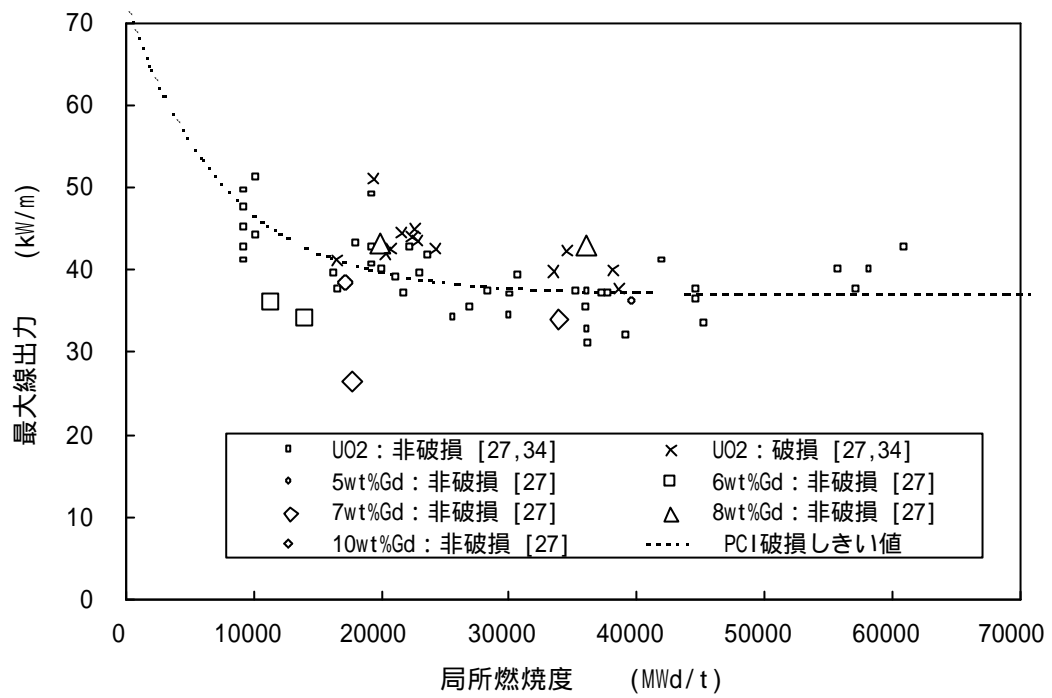


図 2.4-7 高濃度ガドリニア入り二酸化ウラン燃料の耐PCI性(三菱)

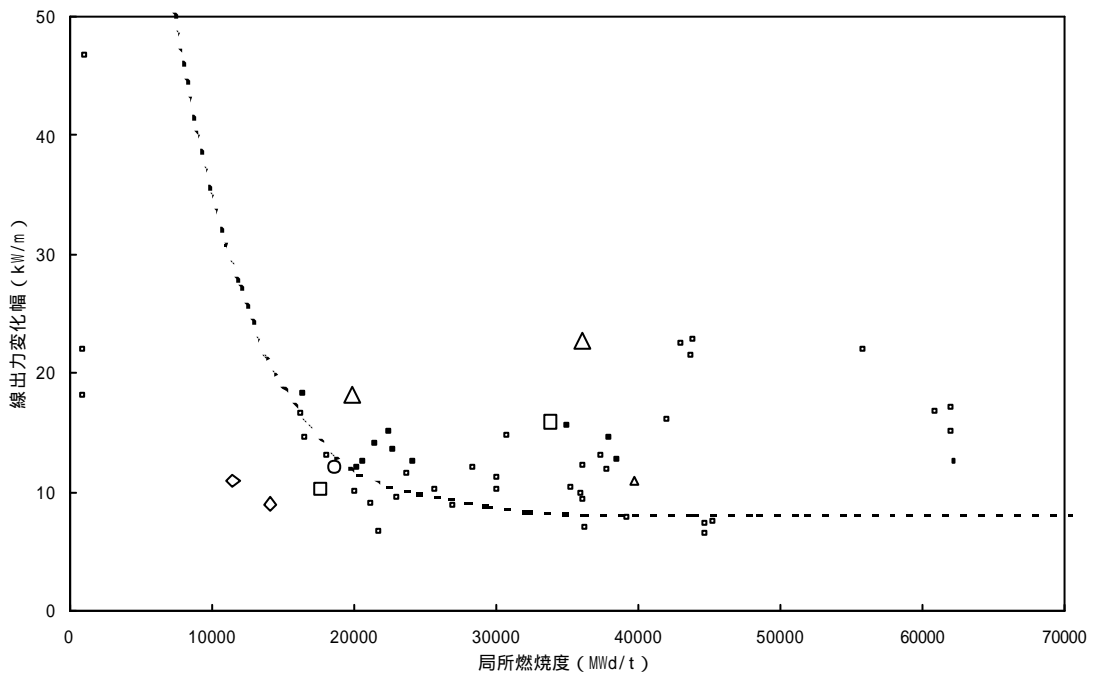
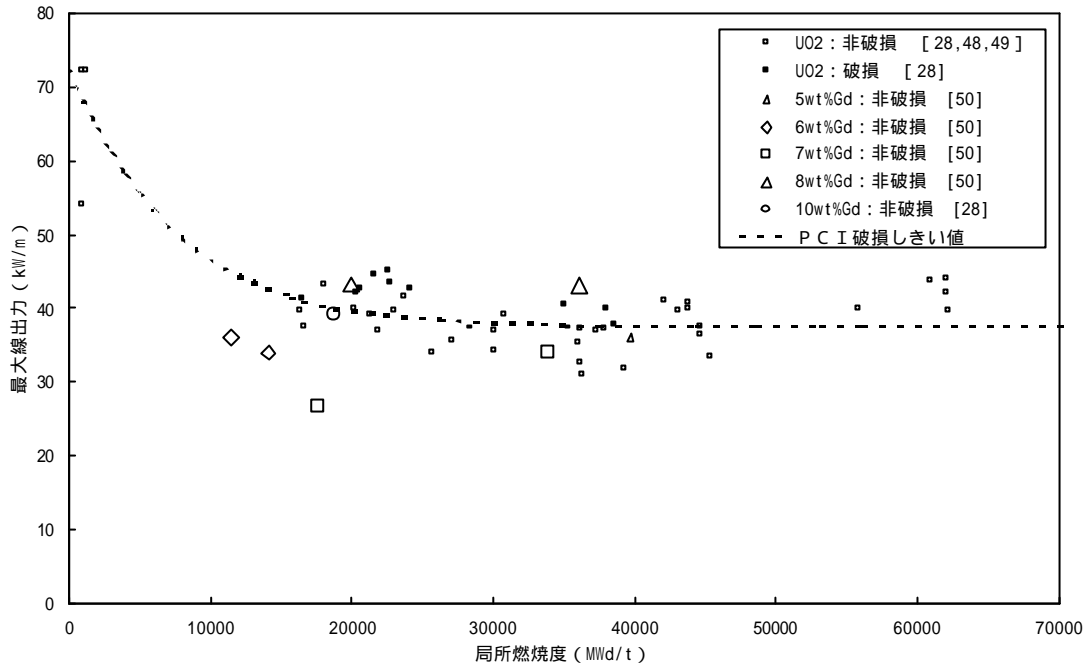


図 2.4-8 高濃度ガドリニア入り二酸化ウラン燃料の耐 P C I 性 (原燃工)

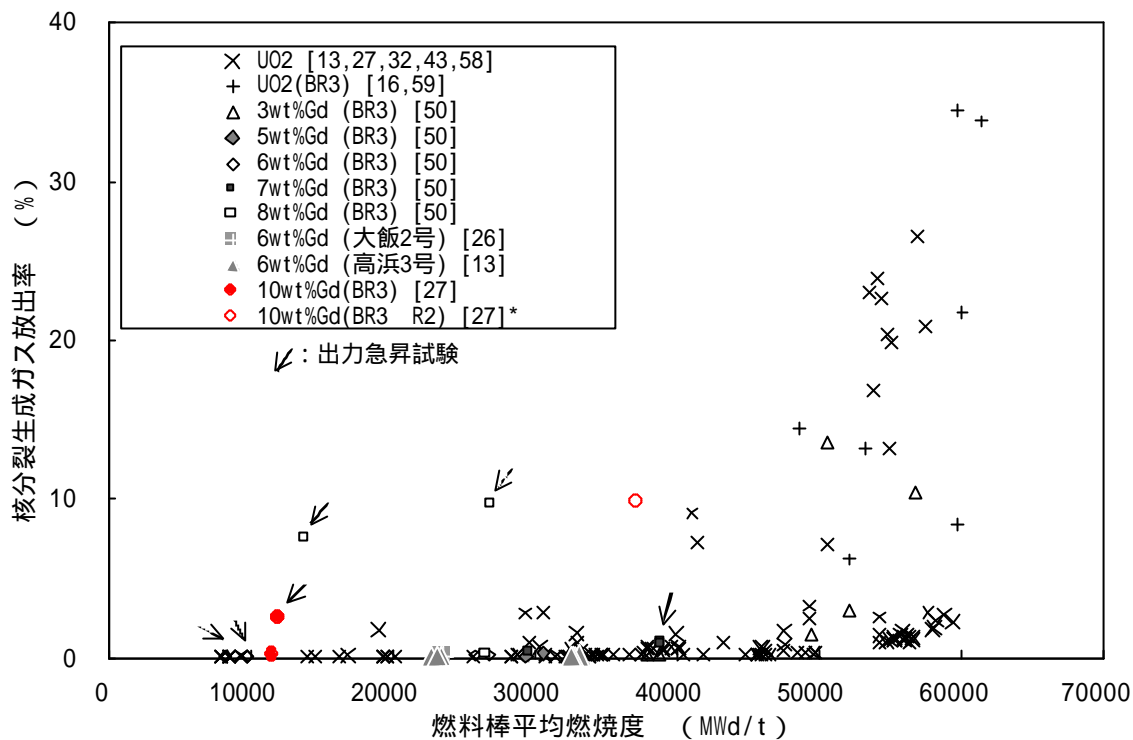


図 2.4-9 (1) 高濃度ガドリニア入り二酸化ウラン燃料の F P ガス放出率 (三菱)

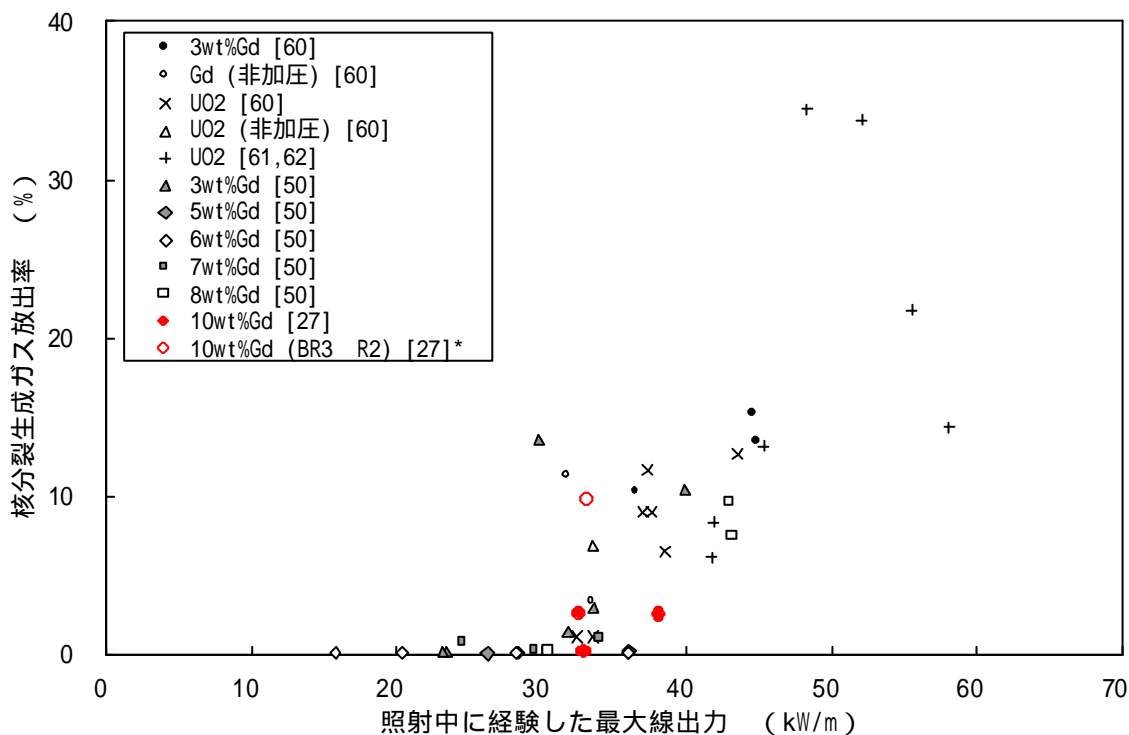


図 2.4-9 (2) 高濃度ガドリニア入り二酸化ウラン燃料の F P ガス放出率 [BR3炉] (三菱)

注 . * を付けた高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの照射データは「高燃焼度化検討会」以降のものである (以下、同様)。また、図2.4-9,10における F P ガス放出率は燃料棒 1 本あたりの値である。

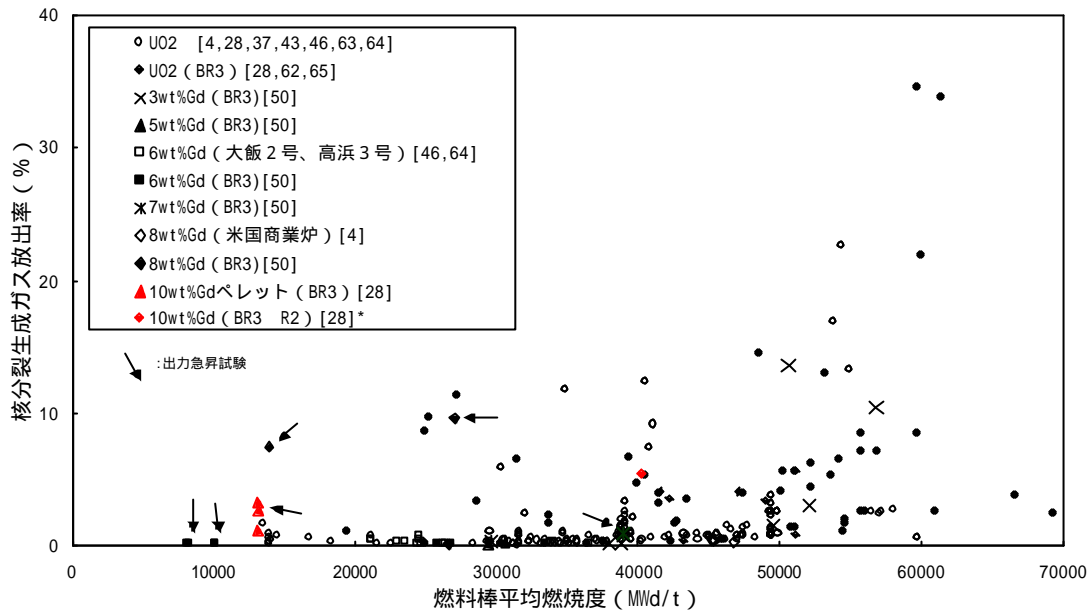


図 2.4-10(1) 高濃度ガドリニア入り二酸化ウラン燃料のF Pガス放出率 (原燃工)

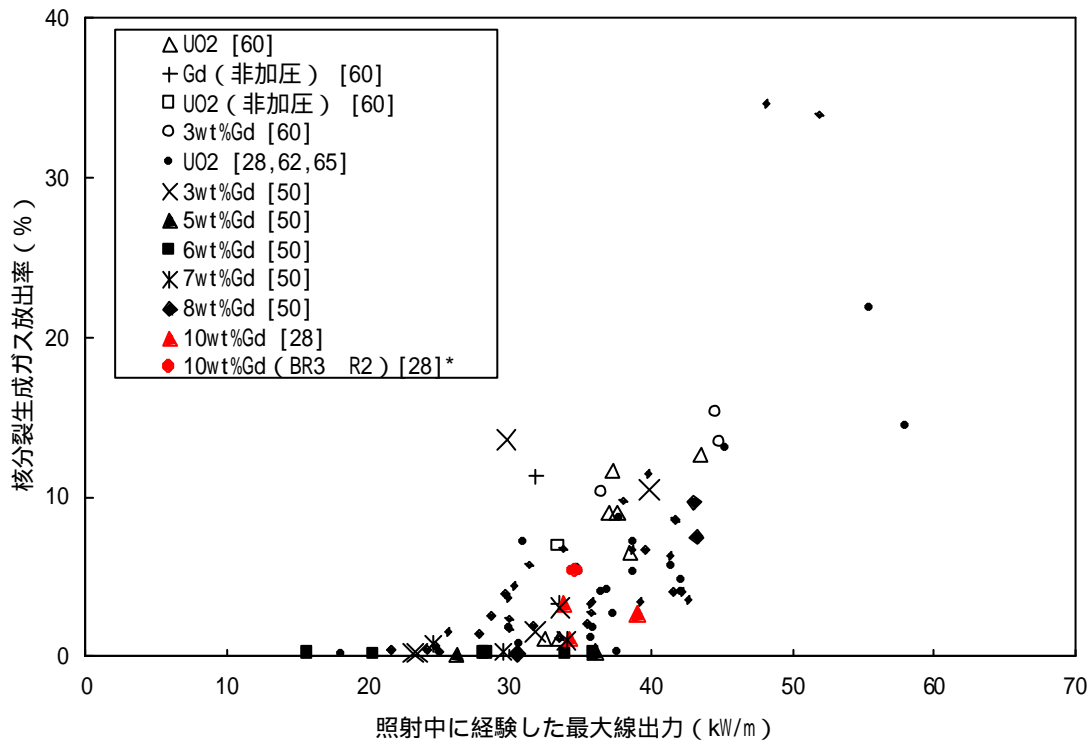


図 2.4-10(2) 高濃度ガドリニア入り二酸化ウラン燃料のF Pガス放出率 [BR3炉] (原燃工)

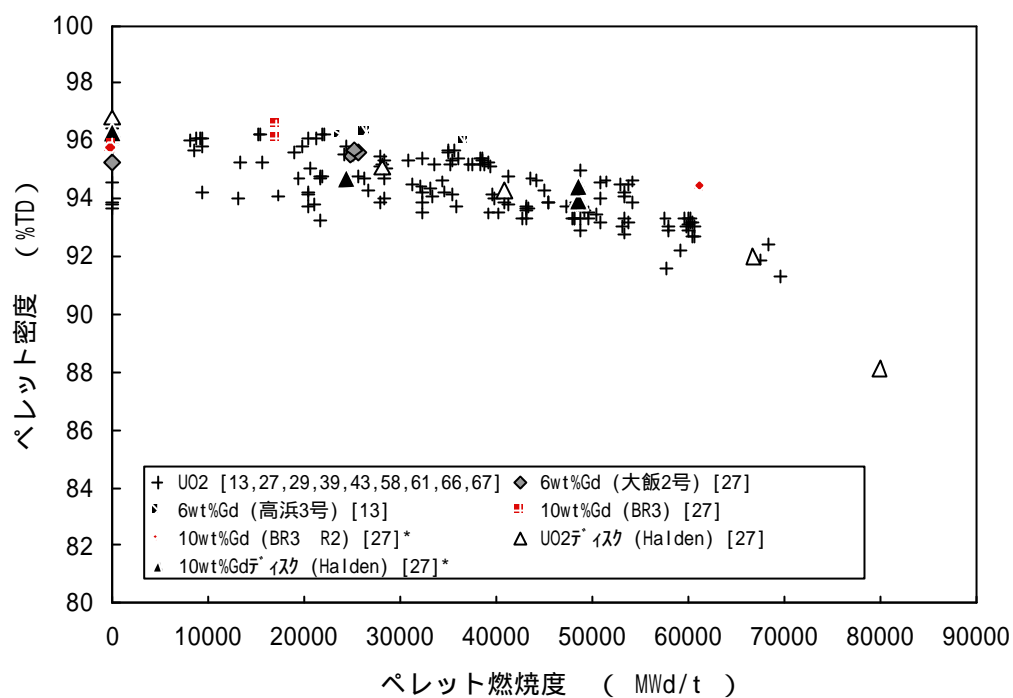


図 2.4 - 1 1 高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの密度変化 (三菱)

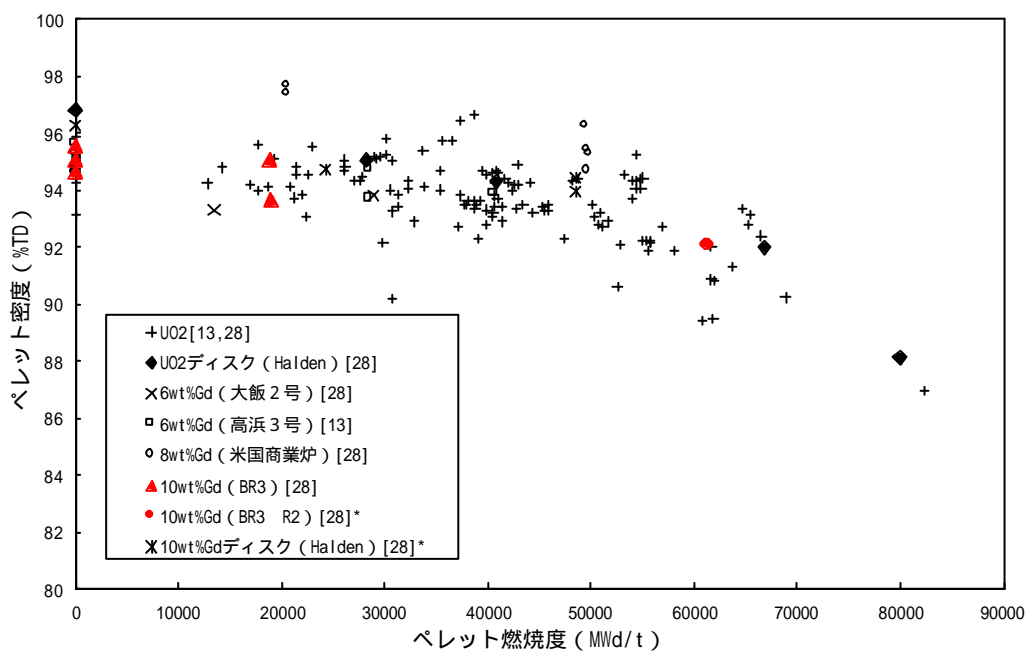


図 2.4 - 1 2 高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの密度変化 (原燃工)

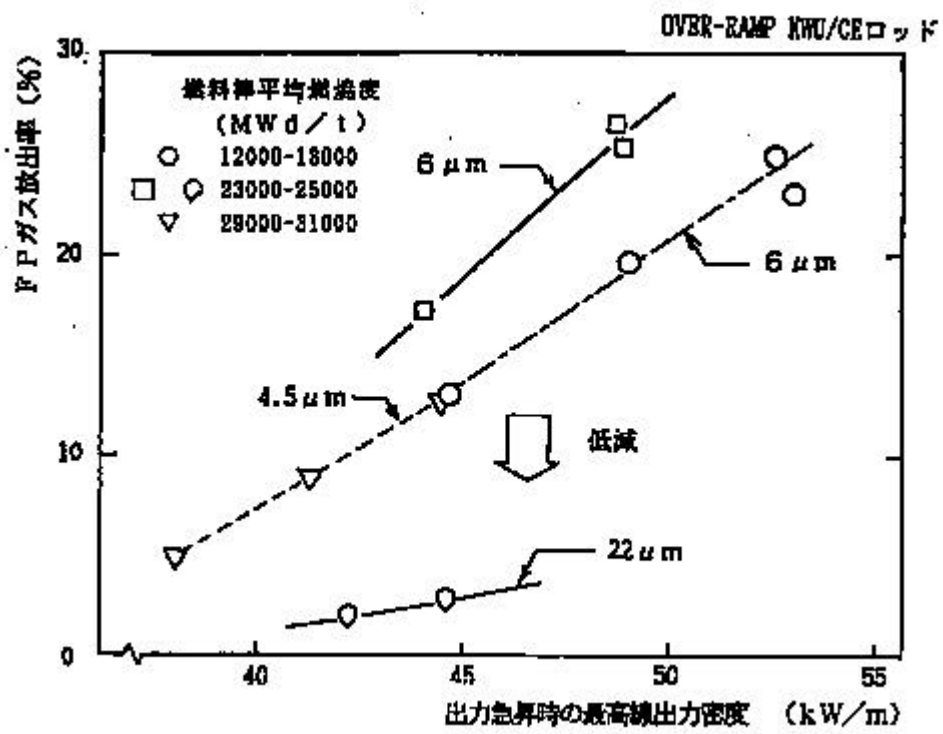


図 2.5-1 大粒径ペレットのFPガス放出低減効果^[26]

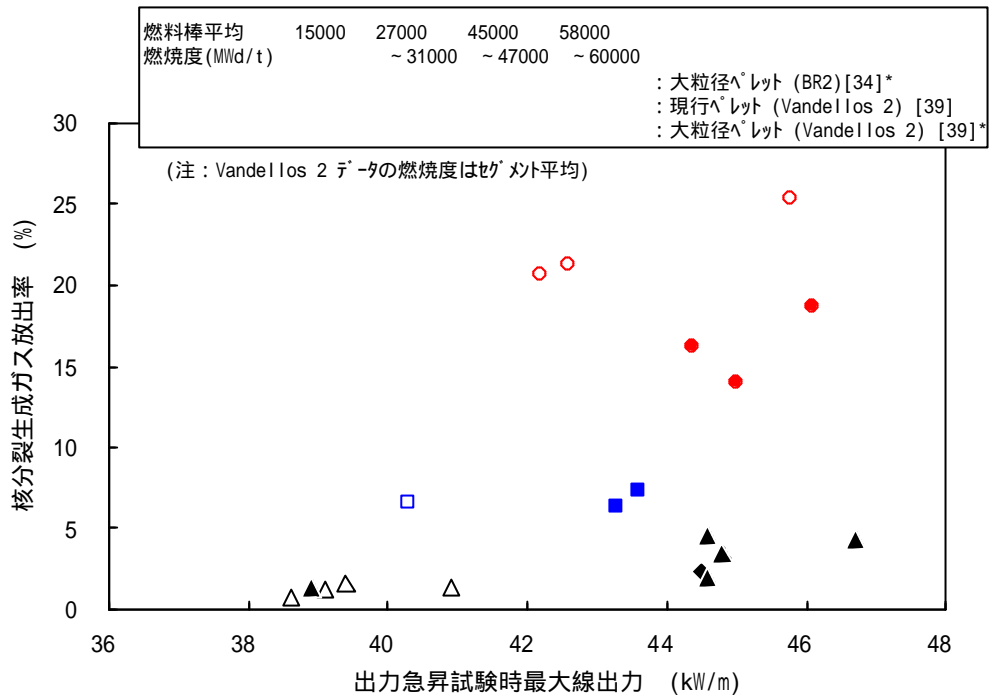


図 2.5-2 出力急昇試験後における大粒径ペレットの F P ガス放出率 (三菱)

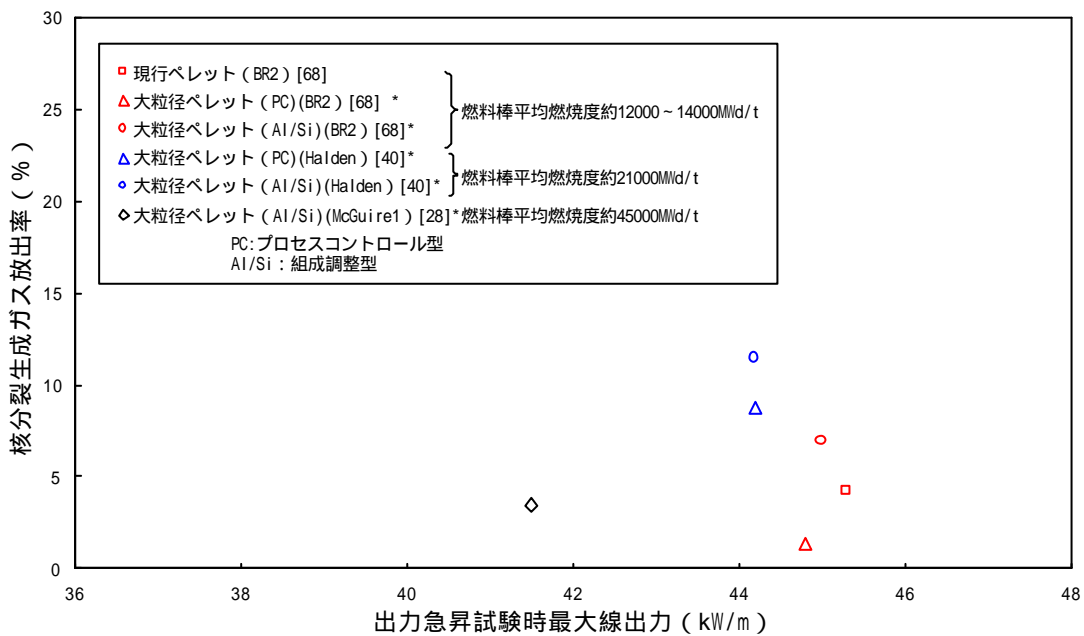


図 2.5-3 出力急昇試験後における大粒径ペレットの F P ガス放出率 (原燃工)

注. * を付けた大粒径ペレットの照射データは「高燃焼度化検討会」以降のものである (以下、同様)。
 また、図2.5-2~5における F P ガス放出率は燃料棒 1 本あたりの値である。

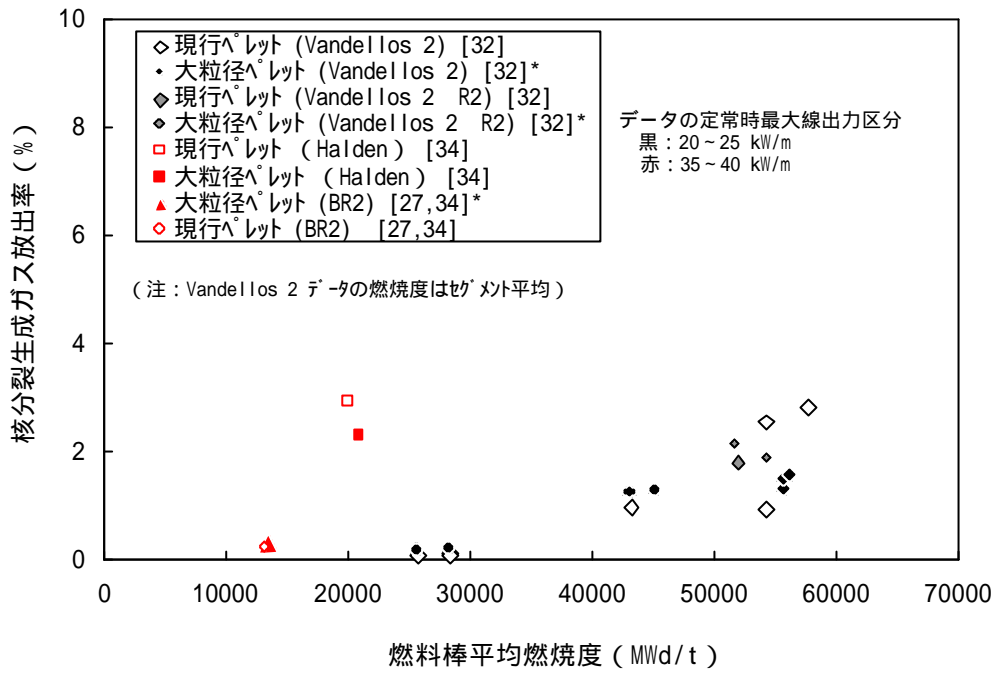


図 2.5-4 定常照射試験における大粒径ペレットのFPガス放出率 (三菱)

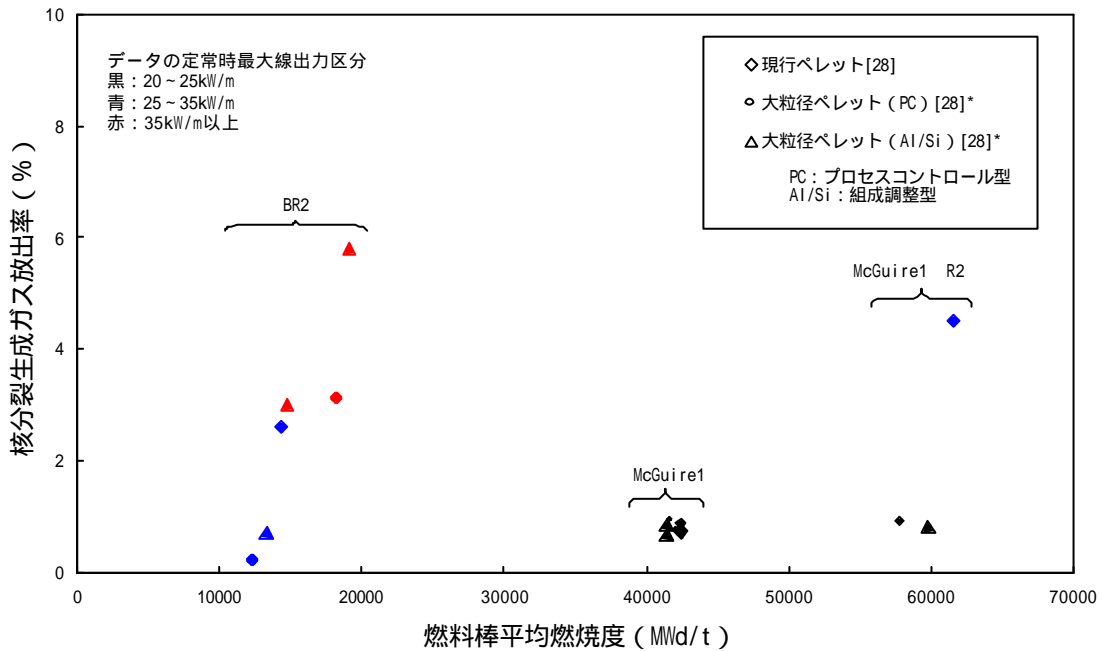


図 2.5-5 定常照射試験における大粒径ペレットのFPガス放出率 (原燃工)

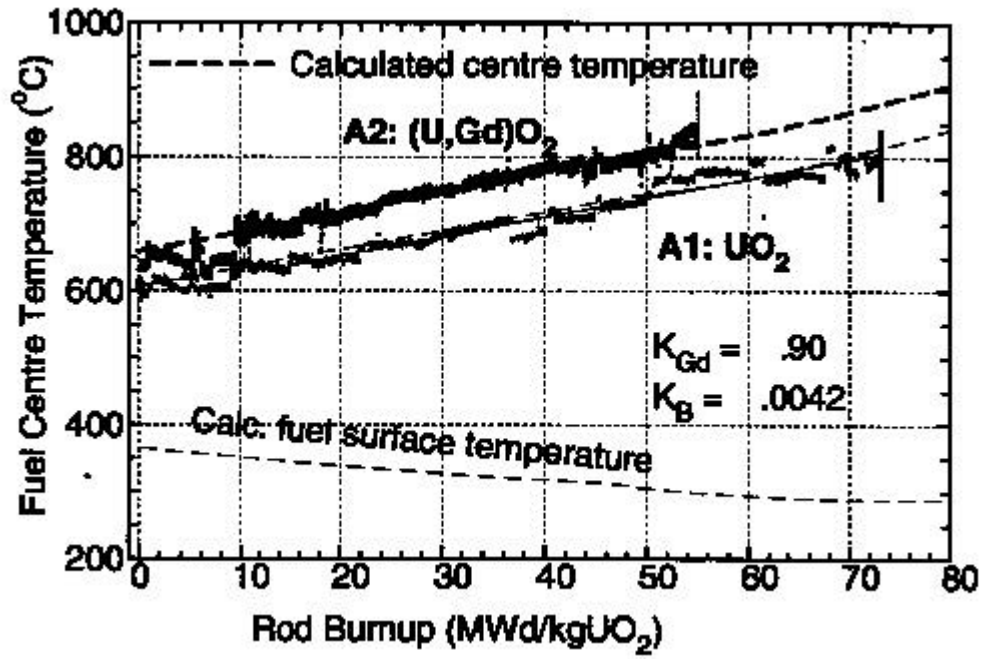


図 2.6-1 燃料中心温度の燃焼に伴う変化^[12]

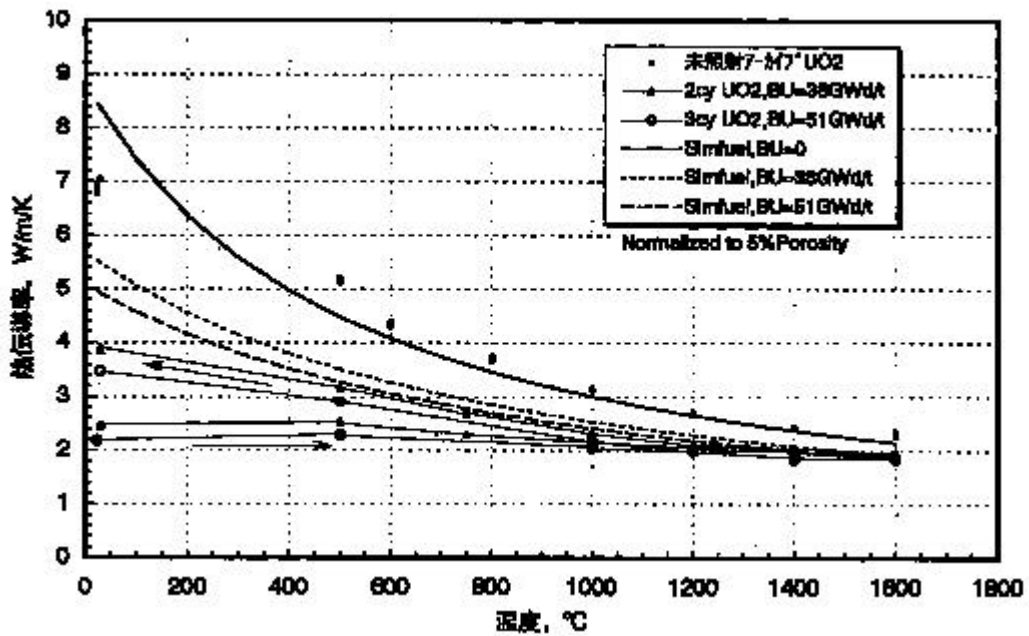


図 2.6-2 照射済みペレットの熱伝導率^[13]

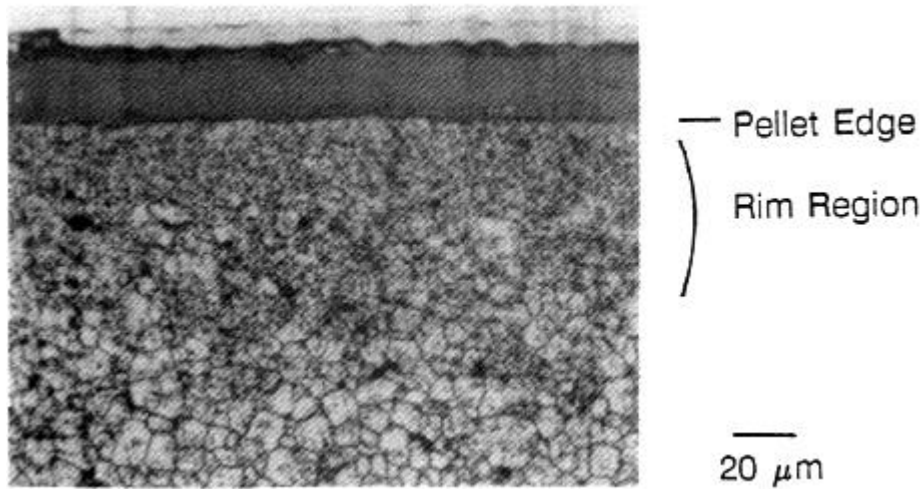


図 2.6-3 リム組織の金相観察例^[16]

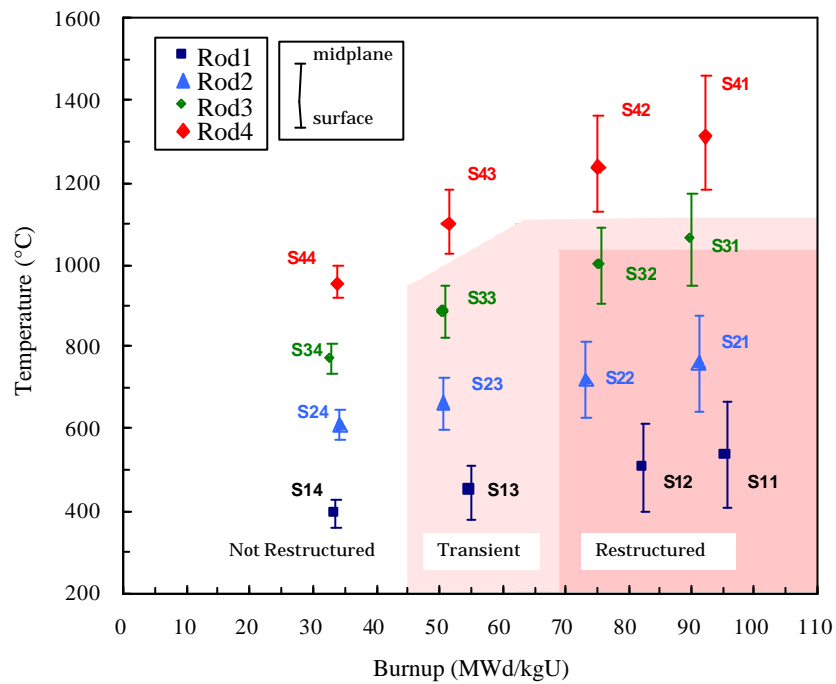


図 2.6-4 リム組織形成のための燃焼度及び温度^[17]
 (拘束力を受けない条件で等温照射されたディスクペレットによる試験結果)

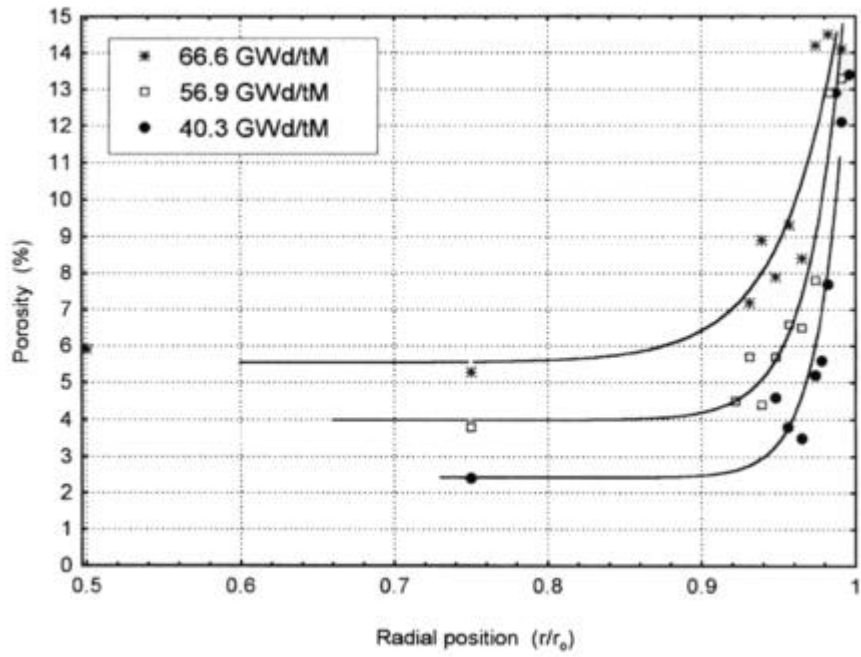


図 2.6 - 5 ペレット外周部における気孔率分布^[18]

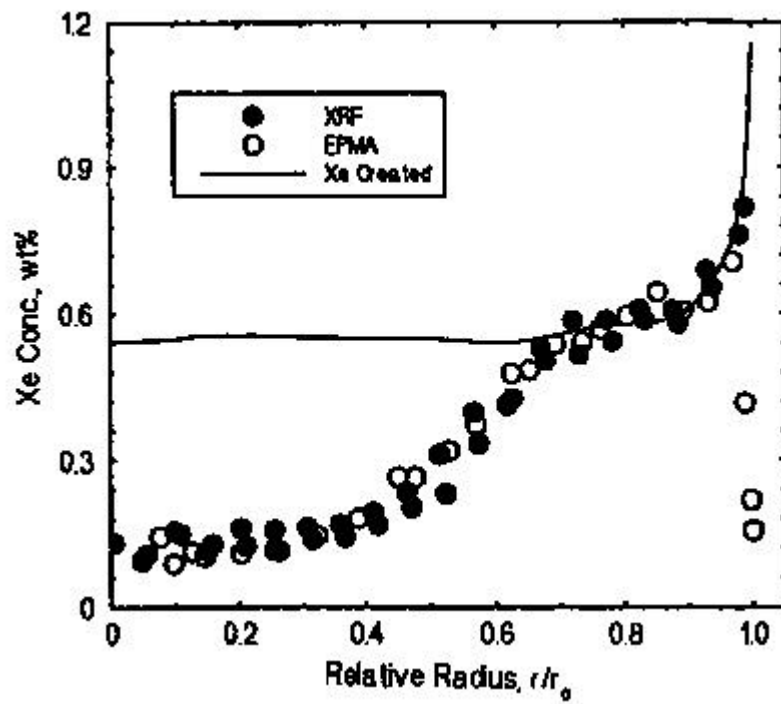


図 2.6 - 6 ペレット外周部におけるXe濃度分布^[19]

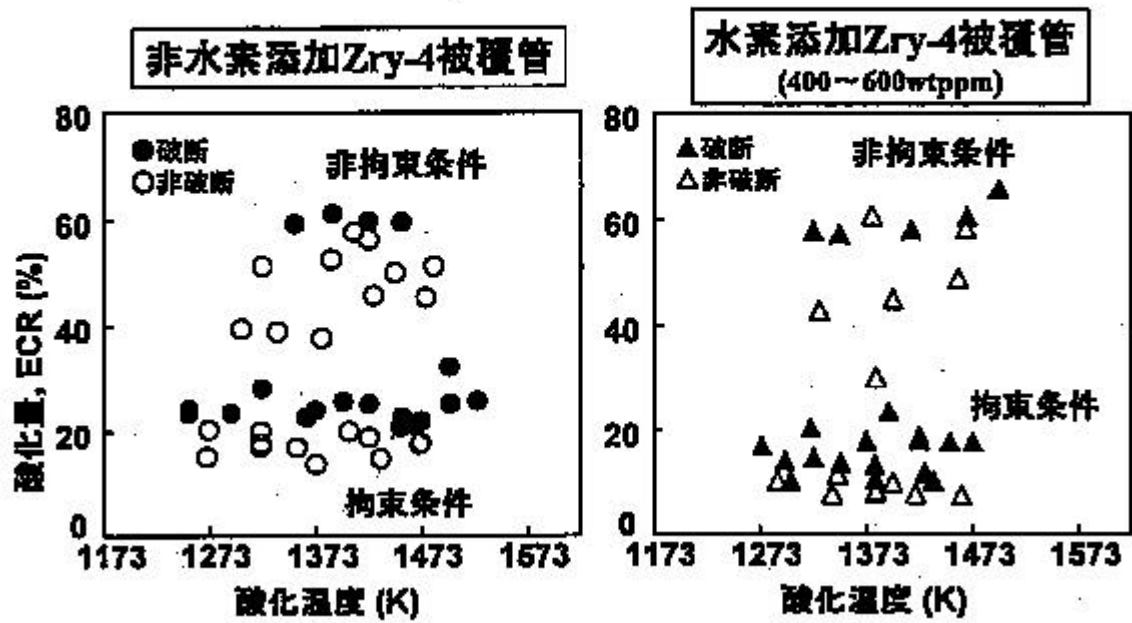


図 2.6 - 7 軸方向完全拘束条件下での燃料棒急冷破断試験結果^[21]

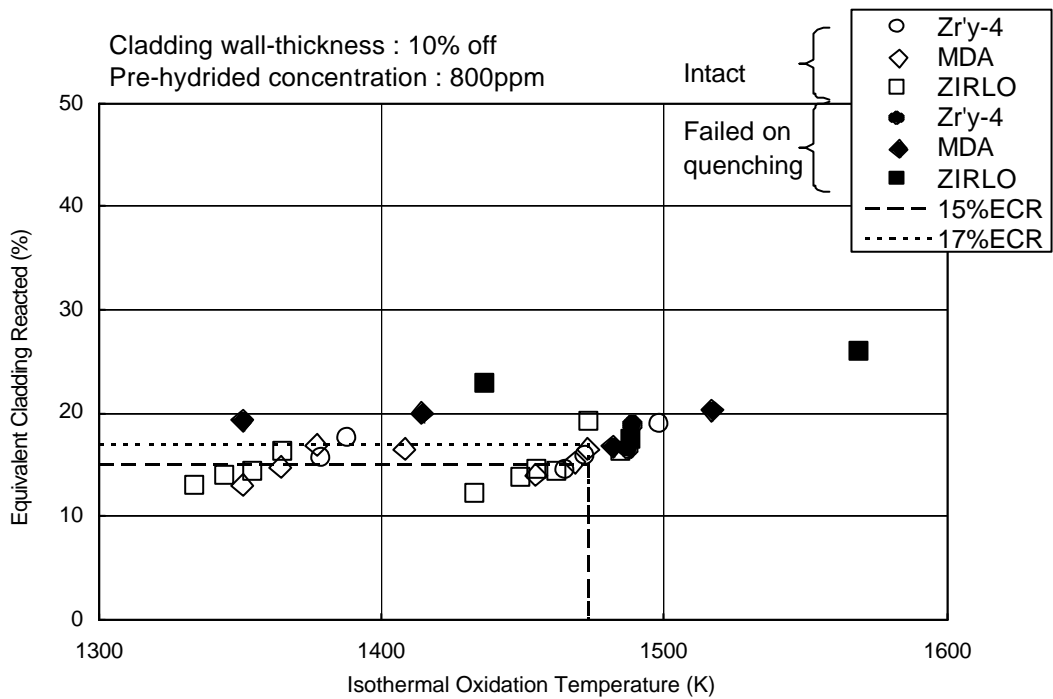


図 2.6 - 8 中間的な軸方向拘束条件(50kgf)下での燃料棒急冷破断試験結果^[23]

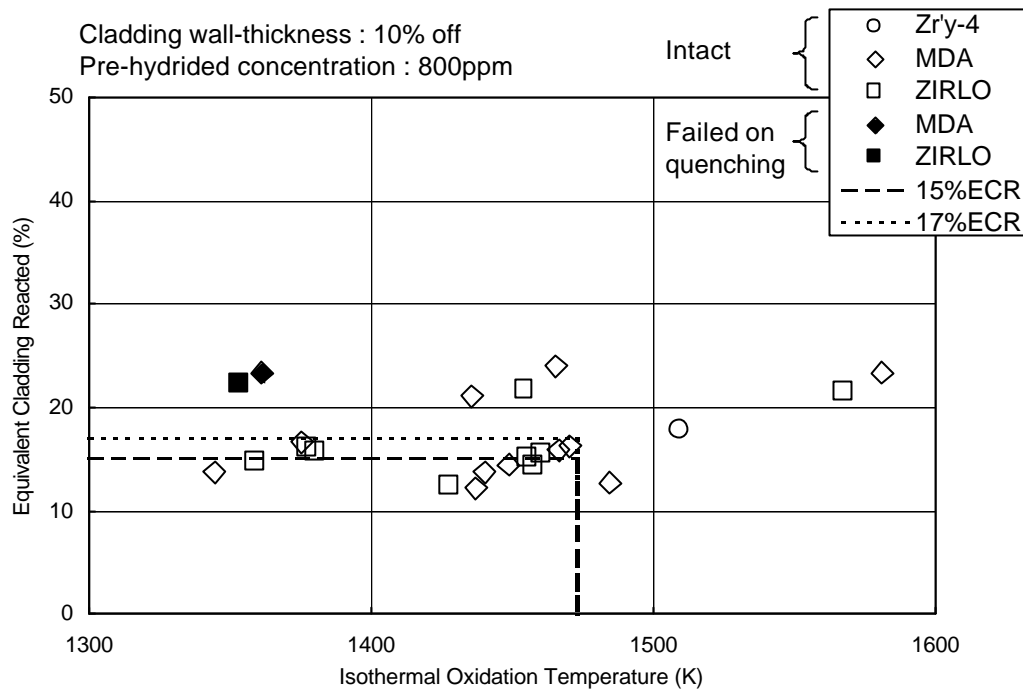


図 2.6-9 中間的な軸方向拘束条件(20kgf)下での燃料棒急冷破断試験結果^[23]

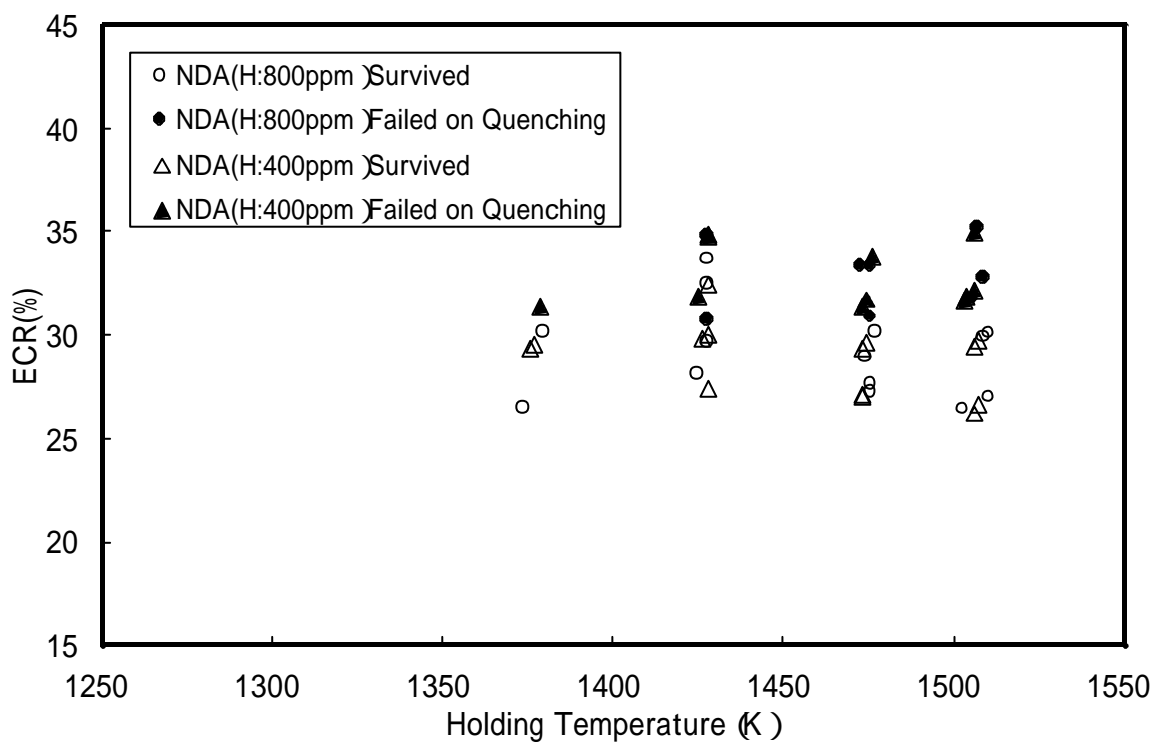


図 2.6-10 中間的な軸方向拘束条件(16kgf)下での燃料棒急冷破断試験結果^[24]

参考文献

- [1] 通商産業省 原子力発電技術顧問会（基本設計）高燃焼度化検討会, "加圧水型原子炉高燃焼度化ステップ2 先行照射燃料検討結果報告書", 1993年4月（原子力安全・保安部会 原子炉安全小委員会 燃料ワーキンググループ 第1回会合(2001年4月24日)における正誤表添付）
- [2] 木戸 他, "耐食性改良ジルコニウム基合金の開発", 日本原子力学会「昭和63秋の大会」, 1988年10月, 神船大
- [3] 木戸 他, "耐食性改良ジルコニウム基合金の開発(2)", 日本原子力学会「1989年会」, 1989年4月, 大阪大
- [4] 原子燃料工業株, "原燃工PWR高燃焼度先行照射燃料について", NFK-8099, 平成6年7月
- [5] G.P.Sabol et al., "Development of a Cladding Alloy for High Burnup", Zirconium in the Nuclear Industry:8th International Symposium, ASTM STP 1023, 227,1989
- [6] G.R.Kilp et al., "Corrosion Experience with Zircaloy and ZIRLO™ in Operating PWRs", ANS Topical Meeting, Avignon, France, 1991
- [7] M.G.Balfouret al., "Westinghouse Fuel Operating Experience at High Burnup and with Advanced Fuel Features", ANS Topical Meeting, Avignon, France, 1991
- [8] G.P.Sabol et al., "Improved PWR Fuel Cladding", IAEA Technical Committee Meeting on Materials for Advanced Water-Cooled Reactors, Plzen, Czech and Slovak Federal Republic, 1991
- [9] H.P.Fuchs et al., "CLADDING AND STRUCTURAL MATERIAL DEVELOPMENT FOR THE ADVANCED SIEMENS PWR FUEL "FOCUS"", ANS Topical Meeting, Avignon, France, 1991
- [10] D.Cubicciotti et al., "Stress Corrosion Cracking of Zircalloys", EPRI-NP-1329, 1980
- [11] M.Hirai, "Thermal diffusivity of UO₂-Gd₂O₃ pellets", J.Nucl.Mat., 173,247, 1990
- [12] T.Tverberg et al., "Study of thermal behaviour of UO₂ and (U,Gd)O₂ to high burnup (IFA-515)", HWR-671, 2001
- [13] (財)原子力発電技術機構, 平成10年度 軽水炉改良技術確証試験（高燃焼度等燃料に関するもの）に関する報告書, 平成11年3月
- [14] J.Nakamura et al., "THERMAL DIFFUSIVITY MEASUREMENT OF HIGH BURNUP UO₂ PELLETS", International Topical Meeting on LWR Fuel Performance, Portland, Oregon, 1997
- [15] M.Hirai et al., "THERMAL DIFFUSIVITY MEASUREMENT OF IRRADIATED UO₂ PELLETS", IAEA Technical Committee Meeting on Advances in Pellet Technology for Improved Performance at High Burnup, Tokyo, Japan, 1996
- [16] J.O.Barner et al., "RELATIONSHIP BETWEEN MICROSTRUCTURE AND FISSION GAS RELEASE IN HIGH BURNUP UO₂ FUEL WITH EMPHASIS ON THE RIM REGION", ANS Topical Meeting, Avignon, France, 1991
- [17] M.Kinoshita et al., "High Burnup Rim Project (V) -Completed scope and needs for further study-", Enlarged HPG Meeting, Lillehammer, Norway, 2001
- [18] J.Spino et al., "Detailed characterisation of the rim microstructure in PWR fuels in the burn-up range 40-67 GWd/tM", J.Nucl.Mat., 231,179, 1996

- [19] M. Mogensen et al., "Behaviour of fission gas in the rim region of high burn-up UO_2 fuel pellets with particular reference to results from an XRF investigation", J. Nucl. Mat., 264, 99, 1999
- [20] M. Kinoshita et al., "HIGH BURNUP RIM PROJECT (II) IRRADIATION AND EXAMINATION TO INVESTIGATE RIM-STRUCTURED FUEL", ANS Topical Meeting, Park City, Utah, 2000
- [21] 永瀬他, "高燃焼度燃料の冷却材喪失事故時挙動研究", 原子炉安全性ワークショップ, 2000年11月
- [22] (編)上塚, "燃料安全研究2000", JAERI-Review 2001-013, 日本原子力研究所, 2001年3月
- [23] K. Honma et al., "Thermal Shock Behavior of PWR High-Burnup Fuel Cladding Under Simulated LOCA Conditions", ANS Annual Meeting, Milwaukee, Wisconsin, 2001
- [24] T. Murata et al., "LOCA Simulation Test of the Cladding for High-Burnup Fuel", ANS Annual Meeting, Milwaukee, Wisconsin, 2001
- [25] U.S. Nuclear Regulatory Commission, SUPPLEMENT 1 TO GENERIC LETTER 90-02, "ALTERNATIVE REQUIREMENTS FOR FUEL ASSEMBLIES IN THE DESIGN FEATURES SECTION OF TECHNICAL SPECIFICATIONS", July 31, 1992
- [26] 三菱原子力工業(株), "三菱 PWR 高燃焼度先行照射燃料について", MAPI-1085, 平成 6 年 9 月
- [27] 三菱重工工業(株), "三菱 PWR 高燃焼度化ステップ 2 燃料の機械設計", MHI-NES-1021, 平成 13 年 9 月
- [28] 原子燃料工業(株), "原燃工 PWR ステップ 2 燃料の改良因子について", NFK-8116, 平成 13 年 8 月
- [29] S. Doi et al., "HIGH BURNUP EXPERIENCE OF PWR FUEL IN JAPAN", ANS Topical Meeting, Avignon, France, 1991
- [30] Y. Iriasa et al., "PROVING TEST ON THE RELIABILITY OF PWR 15X15 FUEL ASSEMBLIES THROUGH THREE REACTOR CYCLES IN JAPAN", ANS Topical Meeting, Williamsburg, Virginia, 1988
- [31] M. Yokote et al., "PWR fuel in Japan, Progress and future trends", Nuclear Engineering International, June 1994
- [32] (財)原子力発電技術機構, 平成 11 年度 軽水炉改良技術確証試験(高燃焼度等燃料に関するもの)に関する報告書, 平成 12 年 3 月
- [33] S. Doi et al., "ADVANCED FUEL DESIGN AND PERFORMANCE FOR BURNUP EXTENSION", ANS Topical Meeting, Park City, Utah, 2000
- [34] T. Takahashi et al., "ADVANCED FUEL DEVELOPMENT FOR BURNUP EXTENSION", ANS Topical Meeting, Portland, Oregon, 1997
- [35] G.P. Sabol et al., "IN-REACTOR FUEL CLADDING CORROSION PERFORMANCE AT HIGHER BURNUPS AND HIGHER COOLANT TEMPERATURES", ANS Topical Meeting, Portland, Oregon, 1997
- [36] (財)原子力発電技術機構, 平成 6 年度 軽水炉改良技術確証試験(高燃焼度等燃料に関するもの)に関する報告書, 平成 7 年 3 月
- [37] K. Mori et al., "VERIFICATION TEST RESULTS OF HIGH PERFORMANCE PWR FUEL", ANS Topical Meeting, West Palm Beach, Florida, 1994

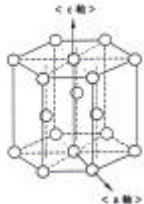
- [38]A.Dumont et al., "ENHANCEMENT OF ZIRCALOY 4 CLADDING RESISTANCE: FROM AFA TOAFA2G", Proceedings of The International Symposium FONTEVRAUD , 1994
- [39] (財)原子力発電技術機構, 平成 12 年度 高燃焼度等燃料確証試験に関する報告書, 平成 13 年 6 月
- [40]K.Goto et al., "UPDATE ON THE DEVELOPMENT OF JAPANESE ADVANCED PWR FUELS", ANS Topical Meeting, Park City, Utah, 2000
- [41]橋本安雄, "関西電力における技術革新のあゆみ", 電気評論, 平成 13 年 1 月
- [42](財)原子力発電技術機構, 平成 7 年度 軽水炉改良技術確証試験 (高燃焼度等燃料に関するもの) に関する報告書, 平成 8 年 3 月
- [43]M.G.Balfour et al., "ZORITA RESEARCH AND DEVELOPMENT PROGRAM: VOLUME 1, FINAL REPORT", WCAP-10180, Vol. 1, 1982
- [44] H.Ikehata et al., "IRRADIATION TEST ON HIGH PERFORMANCE FUEL", ANS Topical Meeting, Portland, Oregon, 1997
- [45] Y.Irisa et al., "SEGMENTED FUEL ROD IRRADIATION PROGRAMME ON ADVANCED MATERIALS FOR HIGH BURNUP", ANS Topical Meeting, Park City, Utah, 2000
- [46] (財)原子力発電技術機構, 平成 9 年度 軽水炉改良技術確証試験 (高燃焼度等燃料に関するもの) に関する報告書, 平成 10 年 3 月
- [47]S.Inoue et al., "Post Irradiation Examination of High Burnup PWR Fuel", J.Nucl.Sci.Tech., 31 [10], 1105, 1994
- [48]S.Djurle et al., "The Studsvik Over-Ramp Project", EPRINP-3007, 1987
- [49]T.P.Papazoglou et al., "FUEL ROD POWER RAMP EXPERIMENT", ANS Topical Meeting, ST.Charles, Illinois, 1977
- [50]P.Blanpain et al., "GAIN FINAL REPORT", GN89/48, 1991
- [51] 水野峰雄ら, "高濃度ガドリニア入り燃料の炉外物性試験(3) - 融点測定 - ", 日本原子力学会「1990秋の大会」, 1990 年 10 月, 東北大
- [52] T.Wada et al., "Behavior of UO_2 -Gd O_3 fuel", BNES Conference, 1973
- [53] 入佐泰弘ら, "高濃度ガドリニア入り燃料の炉外物性試験(1) 熱膨張率測定 ", 日本原子力学会「1990秋の大会」, 1990 年 10 月, 東北大
- [54] 高阪裕ら, "高濃度ガドリニア入り燃料の炉外物性試験(2) - 熱伝導率測定 - ", 日本原子力学会「1990秋の大会」, 1990 年 10 月, 東北大
- [55]Y.Kosaka et al., "THERMAL PROPERTIES AND IRRADIATION BEHAVIOUR OF Gd FUEL", IAEA Technical Committee Meeting on Advances in Pellet Technology for Improved Performance at High Burnup, Tokyo, Japan, 1996
- [56] M.Hirai et al., "Thermal Diffusivities and Thermal Conductivities of UO_2 -Gd O_3 ", J.Nucl.Sci. Tech., 28[11], 995, 1991
- [57]S.Fukushima et al., "THE EFFECT OF GADOLINIUM CONTENT ON THE THERMAL CONDUCTIVITY OF NEAR-STOICHIOMETRIC (U,Gd) O_2 SOLID SOLUTIONS", J.Nucl.Mat., 105, 201, 1982
- [58] U.P.Nayak et al., "FINAL REPORT, EP80-16, HOT CELL EXAMINATION OF ZION FUEL

L, CYCLE 5", WCAP-10543, 1985

- [59] S.Doï et al., "HIGH BURNUP MOX FUEL AND FUEL ROD DESIGN IMPROVEMENT", ANS Topical Meeting, Portland, Oregon, 1997
- [60] P.Blain et al., "HIGH RATED AND HIGH BURNUP GADOLINIA FUEL IRRADIATED IN THE BR3 17x17 PWR", IAEA-SM-288/40, Improvements in Water Reactor Fuel Technology and Utilization, Stockholm, 1986
- [61] M.G.Balfour et al., "BR-3 HIGH BURNUP FUEL ROD HOT CELL PROGRAM, Volume 1: FINAL REPORT", WCAP-10238, Vol.1, DOE/ET 34073-1, 1982
- [62] J.O.Barner et al., "High Burnup Effects Program Final Report", HBEP-61, 1990
- [63] M.Morelet et al., "FRAGEMA FUEL BEHAVIOUR AT HIGH BURNUPS", IAEA Technical Committee Meeting on Fuel Performance at High Burnup for Water Reactor, Nykoping, Sweden, 1990
- [64] M.Yokote et al., "Gadolinia Fuel Usage and Demonstration Program in Japan", ANS Topical Meeting, Avignon, France, 1991
- [65] M.G.Balfour et al., "BR-3 HIGH BURNUP FUEL ROD HOT CELL PROGRAM, Volume 2: DATA SUMMARY", WCAP-10238, Vol.2, DOE/ET 34073-1, 1982
- [66] M.G.Balfour et al., "FINAL REPORT, EP80-16, HOT CELL EXAMINATION OF ZIRCONIUM FUEL, CYCLES 1 THROUGH 4", WCAP-10473, 1985
- [67] J.A.Kuszyk, "HOT CELL EXAMINATION OF SURRY THREE- AND FOUR-CYCLE 17x17 DEMONSTRATION FUEL, Volume 1: PRINCIPAL RESULTS AND EVALUATION", WCAP-10514, Vol.1, DOE/ET 34014-14, 1984
- [68] K.Yamate et al., "BURNUP EXTENSION OF JAPANESE PWR FUELS", ANS Topical Meeting, Portland, Oregon, 1997

用語解説

1. 「PWR燃料の高燃焼度化(ステップ2)について」

	用語	説明	ページ
照射 試験 関連	炉外試験	原子炉において燃料等の試験体を照射する照射試験に対し、照射をともなわずに試験体の特性を確認する試験。	2
	出力急昇試験	PCI破損機構等の研究のため、商業炉等において定常照射した燃料棒を試験炉において出力を急昇し一定時間保持する試験。	5,6,7
	セグメント燃料	商業炉等における定常照射の後に行う試験炉での出力急昇試験等に備え、数本をつなぎ合わせて長尺燃料棒と同じ長さとなるように製作された短尺燃料棒。	33
	Halden	ノルウェーにある重水減速/冷却型試験炉。	7,13,14,17
	BR2	ベルギーにある軽水減速/冷却型試験炉。	17
	R2	スウェーデンにある軽水減速/冷却型試験炉。	17
	Osiris	フランスにある軽水減速/冷却型試験炉。	17
	BR3	ベルギーにある3ループ型PWR商業炉。	17
	NorthAnna1	アメリカにある3ループ型PWR商業炉。	17
	Vandellos2	スペインにある3ループ型PWR商業炉。	17
McGuire1	アメリカにある4ループ型PWR商業炉。	17	
被 覆 管 関 連	炉内クリープ (被覆管クリープダウン)	一定の応力下で時間の経過とともに材料の変形が増加する現象をクリープといい、一般に応力と温度が高くなるほど著しい。被覆管は、PWR炉内において1次冷却材圧力と燃料棒内圧との差圧を受け、燃焼初期では被覆管内面がペレットに接触するまでその外径が徐々に減少(クリープダウン)する。	5,9,21
	照射成長	PWR炉内において被覆管が高速中性子照射等の影響により軸方向に伸びる現象。	5,9,21,34,37
	PCI(Pellet-Clad Interaction; ペレット-被覆相互作用)	燃料棒の出力を上昇させると、ペレットと被覆管の熱膨張差によってペレットが被覆管を押し広げるような機械的相互作用(PCMI; Pellet-Clad Mechanical Interaction)が生じる。また、燃料棒内に腐食性FPガスであるヨウ素等が放出され、被覆管に応力腐食割れが発生する場合がある。このような相互作用をペレット-被覆相互作用という。	3,5,6,9,10,12,17,21,38,39,43,44
	SCC(Stress Corrosion Cracking; 応力腐食割れ)	引張応力を受けた材料が腐食環境下において通常の破壊応力水準よりはるかに低い応力の作用で破壊する現象。	5
	-Zr稠密六方晶	ジルコニウム(Zr)の結晶構造は、常温では相と称される稠密六方晶であり、右図のような原子配列となる。 	5
集合組織調整 (RT; Radial Texture)	材料内における結晶方位の分布状態を集合組織という。集合組織調整管(RT管)は、被覆管の圧延工程を調整することで、ジルコニウム稠密六方晶C軸(稠密六方晶底面に垂直な軸)の被覆管径方向への配向割合を高め、耐PCI性能の向上を図っている。	18,21	

	用語	説明	ページ
ペ レ ット 関 連	ガドリニア入り燃料	ガドリニウム酸化物 (Gd ₂ O ₃) を固溶させた二酸化ウランペレットを用いた燃料。ガドリニウム(Gd)は中性子吸収能力が高く、出力分布の調整やサイクル初期反応度の抑制に用いることができる。	2,6,9, 10,15, 17,18, 21,40-47
	核分裂生成ガス(FPガス)	ウラン等の核分裂反応により生成する元素を核分裂生成物 (Fission Product) という。これらのFPのうち、クリプトン(Kr)やキセノン(Xe)等の気体状のものをFPガスと称している。	2,5-8, 10,12, 13,17, 21,45, 46,48-50
	リコイル・ノックアウト放出	リコイル(反跳)放出は、ペレットの表面近くで生成したFPガスが反跳エネルギーによって直接ペレットから燃料棒内に放出されることをいう。また、ノックアウト(はじき出し)放出は、ペレット表面近くにあるFPガスが、核分裂片による衝突等により放出されることをいう。	7
	拡散放出	二酸化ウランの結晶粒内で生成されたFPガスが、温度分布等に従って結晶粒の境界(結晶粒界)へと拡散移動し、結晶粒界を介してペレットから放出されることをいう。このため、出力や燃焼度といった照射条件に強く依存する。	7
	大粒径ペレット	二酸化ウランの結晶粒径を現行より大きくしたペレット。三菱重工業株製大粒径ペレットでは、現行より焼結特性の良い二酸化ウラン粉末を用いることにより大粒径化を図っている。また、原子燃料工業株製大粒径ペレットには、焼結時の雰囲気制御するプロセスコントロール型と、アルミニウム(Al)とケイ素(Si)を微量添加する組成調整型とがある。	2,7,10, 12,17, 18,21, 48-50
	ペレットスエリング	燃焼に伴うFPの蓄積によるペレット体積の増加、つまりペレット密度が低下する現象。	21
	照射欠陥	二酸化ウランの結晶粒内において、核分裂反応や中性子照射により格子間原子や空孔といった格子欠陥が生成されることをいう。	7
	熱拡散率	熱拡散率は、熱伝導率(熱拡散率、比熱及び密度を乗じたもの)の評価に用いられ、ディスク状試料の片面の温度を変化させたときの反対面の温度変化により測定する。	7,8
	ディスクペレット	ペレット高さを低くしディスク状に成型したペレット。これを金属ディスクと交互に積み上げて被覆管に挿入することで、ペレット内の径方向燃焼度分布や温度分布の平坦化が可能となる。	8,52
	金相観察	顕微鏡を用いてペレットの組織、結晶粒、気孔等を観察する金属組織学的な試験。	8
	蛍光X線分析 (XRF ; X-Ray Fluorescence analysis)	物質にX線を照射すると物質中の元素に特有なX線(蛍光X線)が放出される。この蛍光X線のエネルギーは元素に固有なものであるため、この蛍光X線のエネルギーと強度を測定することにより、物質中に含まれる元素の種類及び量を知ることができる。このような原理を用いた測定器で元素を分析することをいう。	8

	用語	説明	ページ
事故時燃料健全性関連	RIA(Reactivity Initiated Accident ; 反応度事故)	炉心に反応度（炉心での核分裂反応のしやすさを示す量であり、臨界状態からの乖離の程度で示す）が加わることを反応度の投入という。制御棒の飛び出しや1次冷却系が異常に冷却されるような事故においては炉心に正の反応度が加わり、出力が急上昇する可能性がある。このように正の反応度が投入される事故を反応度事故という。	8,13
	NSRR(Nuclear Safety Research Reactor)	原子炉安全性研究炉のことで、原子炉の反応度事故時の燃料破損挙動と破損影響を研究するために、日本原子力研究所に昭和50年に設置されたパルス出力型の研究炉で水冷却の実験炉。	8,13
	CABRI炉	フランス原子力庁(CEA)の下部機関である原子力安全防護研究所(IPSN)所有の反応度事故時の原子炉燃料のふるまいを研究することを目的としたナトリウム冷却の実験炉。	8
	LOCA(Loss Of Coolant Accident ; 原子炉冷却材喪失事故)	何らかの原因で原子炉冷却系の配管破断が発生し、原子炉冷却材が急激に流出し炉心内の冷却材が減少する結果、炉心の冷却能力が著しく低下し、燃料棒の温度が上昇、破損して、多量の核分裂生成物が格納容器内に放出されるに至る可能性のある事故。このため、設計基準事故として想定している。	8-10,13
	再冠水	原子炉冷却材喪失事故においては、一旦、炉心から原子炉冷却材が喪失するが、ECCSによる注入により、炉心の冷却は回復する過程を想定している。この過程を再冠水という。	8
	化学量論的酸化量 (ECR ; Equivalent Cladding Reacted)	燃料被覆管の主成分であるジルコニウムは、1000 を超えるような高温の水蒸気中で、酸化反応を起こす。そのため、原子炉冷却材喪失事故の解析において、この反応を考慮し、どのくらい燃料被覆管が酸化されるかの度合いのことを、化学量論的酸化量と呼んでいる。	8,54,55
	非常用炉心冷却系 (ECCS ; Emergency Core Cooling System)	原子炉冷却材喪失事故等の際に、原子炉冷却系にほう酸水を注入し、炉心の冷却を図るとともに、炉心を未臨界に維持するための設備。 PWRにおける非常用炉心冷却設備は、高圧注入系統、低圧注入系統、蓄圧注入系統からなる。高圧注入系統は、燃料取替用水タンクを水源として高圧注入ポンプにより、炉心にほう酸水を注入する設備である。低圧注入系統は、同様に燃料取替用水タンクを水源として余熱除去ポンプ（低圧注入ポンプ）により、炉心により大量のほう酸水を注入する設備である。蓄圧注入系統は、常時窒素で加圧してある蓄圧タンクを水源として、炉心にほう酸水を注入する設備である。	8
	燃料棒急冷破断試験	原子炉冷却材喪失事故を模擬して、燃料を水蒸気雰囲気中で加熱した後、これを急冷して破損するかどうかを確認する試験。	9,10,54,55
	軸方向完全拘束条件	燃料棒急冷破断試験において、急冷時に、試験に使用する燃料を軸方向に完全に固定する条件のこと。	9,10,54

	用語	説明	ページ
事故時燃料健全性関連	被覆管の膨れ	冷却材の喪失に伴い、炉心圧力が低下するとともに、炉心の除熱が悪くなり、被覆管温度は上昇する。燃料棒の内圧は、ある時点で炉心圧力より高くなる。同時に被覆管温度の上昇に伴い、被覆管の変形が大きくなるため、被覆管は膨れ変形する。	9
	共晶反応	金属Aと金属Bが固体の状態において一部溶け合う場合があり、一般にこれを共晶反応という。インコネル製の支持格子はニッケル基合金からなるが、ニッケルと被覆管構成材のジルコニウムは1000 程度で共晶を生成することが知られている。	9

2. 「燃料の高燃焼度化に係る安全研究の現状と今後の課題」

	用語	説明	ページ
	照射後試験 (PIE ; Post Irradiation Examination)	原子炉において照射された試験体の照射による影響を調べるための試験。外観検査、寸法測定等の非破壊検査と試験体を切断して行う破壊試験に大別できる。	12-14, 22
	M5	高燃焼度域における耐食性改良を目的にフラマトム社が開発したZr-Nb二元合金製被覆管。	12
	ペレットと被覆管のボンディング	ペレットのスエリング及び被覆管のクリープダウンによってペレットと被覆管が接触した後、被覆管の内面には酸化物層が形成される。この酸化物層は、ペレット内のウランの核分裂にて遊離した酸素の一部により被覆管内面が酸化されて生じるが、高燃焼度域においては、ZrO ₂ とUO ₂ の相互拡散により(U,Zr)O固溶体を生成し、ペレットと被覆管が癒着（ボンディング）する場合がある。	13
	NSRRパルス照射実験	原子炉の反応度事故（原子炉に大きな反応度が投入され出力が急上昇する事故）時の燃料破損挙動と破損影響を研究するため、日本原子力研究所のNSRR(Nuclear Safety Research Reactor)を用いて行う短時間のパルス状出力照射試験。	13
	HBRP国際共同研究	ペレットリム組織の形成要因、形成条件等の解明を目的として電力中央研究所が主催して実施している国際共同研究（HBRP ; High Burnup Rim Project）。	14