JAEA-Review 2012-018



ハルデン炉における共同照射試験の現状調査

Research the Joint Program Irradiation Test Status in Halden Research Reactor

花川 裕規 Hiroki HANAKAWA

大洗研究開発センター 照射試験炉センター 材料試験炉部

Department of JMTR Neutron Irradiation and Testing Reactor Center Oarai Research and Development Center

KEVIEN

日本原子力研究開発機構

June 2012

Japan Atomic Energy Agency

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2012

ハルデン炉における共同照射試験の現状調査

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター 照射試験炉センター 材料試験炉部 花川 裕規

(2012年3月15日 受理)

ノルウェーエネルギー研究所のハルデン炉は燃料材料照射試験において世界トップレベルの 試験研究施設の一つである。1959年の運転開始後、原子炉の燃材料について今日まで、様々な 試験研究が行われている。JMTR の軽水炉照射分野の照射技術の高度化に資するために、ハル デン炉で近年行われている共同照射試験について公開文献等を元に調査を行った。

近年照射試験は、燃料、材料、水化学の3分野について行われている。燃料分野試験では燃料の総合試験だけではなく、商用炉で使用された高燃焼度燃料をもちいた LOCA 試験及びリフトオフ試験といった異常過渡時に関する試験、被覆管のクリープ特性及び燃料等の基礎特性に関する試験研究等が行われている。材料及び水化学分野の試験では、原子炉の高経年化にともなう炉内構造物及び被覆管の健全性に関する試験が行われている。また計装装置については上記の試験においてオンライン・オンパワーでの炉内計測を可能にする計装装置が開発されており、さらに高温高圧条件下で使用可能な計装装置の開発に取り組んでいる。

本報告書でまとめられた情報は JMTR 等の照射技術の高度化に有用な情報である。

大洗研究開発センター: 〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

Research the Joint Program Irradiation Test Status in Halden Research Reactor

Hiroki HANAKAWA

Department of JMTR, Neutron Irradiation and Testing Reactor Center Oarai Research and Development Center Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received March 15, 2012)

Halden Boiling Water Reactor(HBWR) in Norway, which is operated by IFE, is the one of the best research reactor for nuclear fuel and material testing in the world. The irradiation test in nuclear fuel and materials has been carried out since the first criticality in 1959. Recent joint program tests are summarized based on open literatures in order to improve irradiation techniques deeply in JMTR

Recent irradiation test has been carried out in 3 areas which are fuel, material and water chemistry. Regarding fuel test, not only integral test for fuel behavior also transient test, for instance LOCA test and lift off test, and basic property test, for instance cladding creep test are conducted. Concerning material and water chemistry test, integrity test against aging are conducted for the cladding and the materials used in reactor. Regarding instrumentation, developed instrumentations enable on-line measurement under reactor operation condition. Moreover, instrumentation development has been forwarded in order to use instrumentation under more high temperature and pressure conditions.

Summarized information in this report is useful to improve irradiation techniques deeply in JMTR.

Keywords:Halden, Irradiation Test, Nuclear Fuel, Nuclear Material, Instrumentation

目 次

1. はじめに1
1.1 ハルデン炉の概要1
1.2 主な照射試験用設備1
2. 照射試験2
2.1 燃料照射試験2
2.2 材料照射試験6
3. 炉内計装装置9
3.1 炉内計装装置9
3.2 計装装置の開発10
4. まとめ11
謝辞12
参考文献12

Contents

1. Introduction	Ĺ
1.1 Outline of Halden Boiling Water Reactor1	L
1.2 Major facilities for irradiation test	Ĺ
2. Irradiation test2	2
2.1 Irradiation test for nuclear fuel2	2
2.2 Irradiation test for nuclear material	5
3. In-pile instrumentation)
3.1 In-pile instrumentation9)
3.2 development of In-pile instrumentation10)
4. Summary11	
Acknowledgements12	2
References 12	2

This is a blank page.

1 はじめに

ノルウ_えーエネルギー研究所のハルデン炉は燃料材料照射試験において世界トップレベルの 試験研究施設である。歴史は古く 1959 年から原子炉運転が開始され、今日まで試験研究及び開 発が行われている。

JMTRの軽水炉照射分野における照射技術の高度化に資するために、近年ハルデン炉で行われている共同照射試験に関して公開されている論文等を参考にし、試験目的、試験方法、使用されている計装及び試験結果等に関し調査を行いまとめた。

1.1 ハルデン炉の概要

ハルデン炉、Halden Boiling Water Reactor (以下 HBWR とする) はノルウェーのハルデ ンにある沸騰水型の試験研究炉である。所有は Institute for Energy Technology (以下 IFE とす る) で初臨界は 1959 年 6 月 29 日である。この炉は原子炉の安全性研究にかかわる燃料及び 材料照射、炉内計装開発のための照射用原子炉として設置された。HBWR 緒元を Table 1 に 示す。^{1), 2)}

原子炉の炉心に装荷される燃料集合体には、標準燃料集合体 (SFA)、計装付燃料集合体(IFA) 及び燃料フラスコ集合体(FFA)と呼ばれるものが使用されている。SFA には 8 本タイプと、9 本タイプと extended タイプの 3 種類がある。8 本タイプは 8 本の燃料ピンが、9 本タイプ及 び extended タイプは 9 本の燃料ピンがシュラウド管(ジルカロイ製)の中にサークル状に配置 されている。装荷されているドライバー燃料ピンの長さは通常 800mm、extended タイプでは 800~1000 mm である。燃料は焼結された UO₂ペレットで被覆管にはジルコニウム合金が用 いられている。 IFA は、いわゆる照射リグのことであり、実験目的によりさまざまな燃料・ 材料が装荷される。各種燃料 (UO₂、MOX、トリウム/UO₂)の濃縮度は 20%以下のものが使 用されている。FFA とは圧力フラスコと一体になった燃料集合体で、圧力フラスコ内に装荷 される試験リグの高速中性子束を高くするために 12 本の PWR タイプの燃料ピンが周囲に装 荷されている燃料体である。燃料は焼結 UO₂ペレット、被覆管は Zr-4、長さは 400 mm もし くは 800 mm、濃縮度約 13wt%である。 Fig.1 に炉心図を示す。

1.2 主な照射試験用設備

次に様々な照射試験に使用されている照射設備について示す。^{3)、4)、5)}

1.2.1 高圧水ループ

高圧水ループは照射試験中の水条件を管理するための装置である。ループ内の水は軽水もし くは重水の選択が可能である。加圧タンクと電気ヒーターを備えており 17.5MPa (175bar)、 350℃の水条件まで再現可能である。また、精製系及び化学系を有し、水質管理・維持及び化 学物質の添加(ボロン、リチウムなど)が可能である。2006年時点で3種類の水ループ(通常 ループ、ブースターロッド付、水位下降型装置(LOCA型))がある。また6から10ループ が同時に設置可能である。Fig.2 に模式図を示す。

1.2.3 燃料棒ガスフローシステム

燃料棒内にガスを流すシステムであり、Fig.3 に模式図を示す。ガスを流すことで、燃料と被 覆管間の抵抗を測定し燃料の出力及び燃焼度との相関を調べる。さらに燃料棒内のガス比及 びガス圧力をコントロールしてギャップ伝達率及び燃料温度へのガス圧及びガス比の影響を 調べることもができる。また燃料棒以降の流路部分に設置されているコールドトラップとガ ンマスペクトルメーターにより燃料棒内から流れてきたガス中の核分裂生成物種類(FP種) を測定できる。

1.2.4 ヘリウム3中性子コントロールシステム

中性子吸収材であるヘリウム 3 ガスを燃料の周りに配置した細管に圧入し、ガス圧力をコン トロールすることで試験燃料棒の中性子束を調整するシステムである。ペレット被覆管相互 作用や FGR (Fission Gas Release FP ガス放出)などを観察する試験に用いられる。ガスを圧 入する細管の設計圧力は 0.6MPa(60bar)である。

1.2.5 超高圧ガスシステム

燃料棒ガスフローシステムの圧力は0.8MPa(80bar)程度なのに対して超高圧ガスシステムのコ ンプレッサーは60MPa(600bar)まで昇圧可能である。このシステムで作り出した超高圧ガスは 照射試験に用いられるベローズ、燃料棒、キャプセル等に注入され試験条件を作り出すのに 使用される。

1.2.6 直径ゲージ水力駆動システム

直径ゲージ水力駆動システムの模式図を Fig.4 に示す。このシステムは炉外部に設置される純 水加圧系統と炉内の駆動ユニットからなる。加圧用の純水ループと炉内の駆動ユニットを接 続し、純水の圧力差を利用して、直径ゲージを燃料棒に沿って縦方向に移動させることで燃 料被覆管の直径計測を可能にしている。図中の3方弁により直径ゲージの移動方向を変更で きる。

2. 照射試験

2.1 燃料照射試験

HBWR は、重水による減速を行っているので有効炉心が軽水に比べ大きくなる。また原子炉 容器の蓋が平坦であるため計装付試験リグの挿入が容易である。以上の 2 つの大きな特徴を有 するため、原子炉燃料のふるまい試験に非常に適している。⁶1962年に計装つき燃料集合体が初 めて装荷されて以来さまざまな燃料試験が実施され貴重なデータを提供している。

次に近年 HBWR で行われている燃料試験について公開されている文献を元に試験の概要及び 結果等についてまとめた。

2.1.1 Gd 含有燃料試験

運転初期の燃料の反応度を抑えるために可燃毒物の Gd を含んだ燃料について、この Gd 含有 燃料の燃料ふるまいを観察する試験である。^{7)、8)、9)、10)}特に、燃焼度の増加に応じ燃料の形状変 化、PCMI (Pellet Cladding Mechanical Interaction ペレット被覆管力学的相互作用)及び FGR

(Fission Gas Release FP ガス放出) についてふるまいの研究を行うための試験である。ハルデンにおける Gd 含有燃料試験のうち、VVER(ロシア型加圧水型原子炉)用 Gd 含有燃料に関する試験結果が公開資料となっているため、このテストについてまとめた。

試験燃料模式図及び試験リグ断面図を Fig.5 に示す。ここで示す試験燃料は6本(大粒径燃料2本、 標準粒径燃料2本、Gd含有燃料2本)あり、各試験燃料の両端には図に示すように各

種の計装が取り付けられている。Gd 含有燃料には、1本目に熱膨張型燃料中心温度計、燃料伸び計及び被覆管伸び計が装荷されている。2本目には熱電対型燃料中心温度計、内圧計及び燃料伸び計が装荷されている。中性子束検出器はリグの中心部及び外周部に6本設置されている。

照射試験は新燃料(未照射)を試験リグに装荷しオンライン及びオンパワー計測でデータを 取得解析している。平均線出力は大粒径の標準燃料で30kW/m程度、目標燃焼度は60MWd/kgUO₂ に設定されている。

Gd 含有燃料の照射試験結果を Fig.6 及び Fig.7 に示す。Fig.6 より、Gd 含有燃料は照射初期においては、はっきりとした焼きしまりが観察されなかったが 4MW d/k g UO₂ あたりにおいて焼きしまりが観察された。スエリングについては標準燃料と類似したものになることが報告されている。

熱的なふるまいとして Fig.7 に標準化した燃料温度を示す。標準化燃料温度は照射最初には低下し燃焼度が 0.5MWd/kgUあたりから上昇し始める。これは燃料の周方向の出力分布の影響である。毒物である Gd については 4MWd/kgUO₂ あたりでほぼ全部燃焼してしまうことが結果として得られている。これらの熱的ふるまいの結果は参考文献 10)に示されているように計算コードの改良に役立てられている。

2.1.2 ディスク燃料照射試験

高燃焼度での燃料使用のために高燃焼度域における焼きしまり及びスエリング、リム部の HBS (High Burnup Structure 高燃焼度組織)形成、熱伝導率、クリープ及び機械的性質、そして FP ガス放出などの基本特性をより詳細に知るための試験シリーズである。¹¹⁾

基本特性をより正確に理解するためには照射履歴が明確で、照射試料温度が均一で一定であ ることが必要になる。このために、Fig.8 に示すようにディスク型の試験燃料が持いられた。デ ィスク型の燃料を熱伝導率の高いモリブデンディスクに挟み込むことで、燃料ディスク内の熱 が逃げやすくなり、モリブデンディスクの厚みを調整することで目標照射温度を調節し、かつ 燃料ディスク内の照射温度勾配が小さくなるように設計されている。この試験で主に使用され た計装は熱電対型燃料中心温度計、内圧計、燃料伸び計及び被覆管伸び計である。ディスク燃 料照射試験シリーズの条件等を Table 2 に示す。またディスク燃料は短時間の照射試験で高燃焼 度に到達するように濃縮度が 20~26w/o²³⁵U のものが採用されている。各試験結果を以下に簡単 に述べる。

IFA-569 はハルデンで行われた最初のディスク燃料試験である。ガスフローシステムが接続された試験燃料より粒界でのガス気泡結合は Gd 含有燃料で 1200℃ 40MWd/kgOxide、標準燃料 で 1150℃ 50MWd/kgOxide、で起こることが明らかになった。また PIE (Post Irradiation Examination 照射後試験)にて熱拡散率の測定、密度測定及びアニールによる FP ガス放出試験 が行われた。

IFA-563 からはインパイル試験にて、FP ガス放出と粒径の関係の研究のために 4,8,16 µ m の粒 径の燃料が装荷された。また IFA-569 と IFA-563 のガスフローシステムに接続された燃料の試験 結果より、燃料温度が低い領域では温度依存性が無いと考えられていた FP ガス拡散係数に弱い 温度依存性があることがわかった。Fig.9 その結果を示す。上部のグラフ中の実線及び点線はこ れまで考えられていた温度依存性が無いモデルでの計算結果を示し、下部のグラフは温度依存 性が有るモデルでの計算結果を示している。これより温度依存があるモデルのほうが実験値と よく一致した。

IFA-601 からはさまざまな燃焼度と照射温度のサンプルを作成して HBS 形成のしきい値がど こにあるのかが研究され、燃焼度のしきい値が 55 から 65GWd/tM、温度のしきい値が 1110℃ 以下において HBS が形成し始めることがわかった。ただしディスク燃料は商用炉の燃料より濃 縮度が高いためその点は考慮が必要である。

IFA-649 については現在 PIE を行っているところである。

IFA-655 では MOX と UO₂のスエリングと FP ガス放出が研究された。この試験からさまざま なタイプの R/B (Release/Birth) と S/V (Surface/Volume)の変化が観察された。結果を Fig.10 に 示す。Fig.10 から殆どの試験燃料で HBS 形成の燃焼度を通り越しても、低い温度の燃料には FP ガス放出の大きな増加はないことがわかった。R/B と S/V が大きく変化している 2 本の燃料に ついては意図しない温度上昇が起こったためである。又この試験にて高燃焼度まで照射された 燃料のいくつかは出力上昇試験が予定されている。

個々に簡単に示したが、5 種類のディスク燃料の試験から高燃焼度における燃料の特性につい ていくつかの知見を得ることに成功しており、燃料設計や計算コードの精度向上に寄与してい ることが報告されている。しかし依然として高燃焼度燃料における特性を解明する必要がある。 今後ハルデンでは照射誘起クリープ試験が予定されている。この試験はベローズを用いた加負 荷装置にて試験燃料に圧縮負荷を加え LVDT (Linear Variable Differential Transforme 作動トラン ス)にて燃料長の変形を計測する試験である。

2.1.3 LOCA 試験

ハルデンで行われている最新の LOCA シリーズでは、商用炉で使用された高燃焼度の燃料を ホットラボに持ち込み短尺化し計装を取り付けて試験が行われている。^{12)、13)}

テストリグの縦断面及び横断面を Fig.11 及び 12 に示す。試験燃料は圧力フラスコと呼ばれる 容器に収められている。圧力フラスコはシュラウドと呼ばれる円筒状の筒に収められ原子炉炉 心に納められている。圧力フラスコは水ループに接続され圧力フラスコ内の冷却水の条件は PWR/BWR/VVER 条件に調整可能である。また圧力フラスコはブローダウンラインと呼ばれる 系統にも接続されている。シュラウド内には中性子検出器及び He-3 コイルが装荷されている。 圧力フラスコ内には、試験燃料棒、模擬燃料の役割を果たすヒーター、冷却スプレー、冷却水 入口出口温度計が装荷され、燃料棒には被覆管温度計、被覆管伸び計及び内圧計が装荷された。 またループ内にガンマモニタが設置されている。

試験は燃料棒線出力を一定の状態をある程度の時間保ち、温度及び内圧等が平衡状態になっ てから試験を開始する。最初にバルブを閉じて冷却水断とする(ブローダウン)。被覆管が膨れ るバルーニングが始まり、被覆管が破裂するバーストが起こり、その後原子炉をスクラムして 試験が終了する。試験中の温度変化及び線出力変化を Fig.13 に示す。炉内試験終了後にはリグ のガンマスキャンが行われ、燃料及び被覆管の状態を確認した後、ホットラボに移送し PIE が 行われる。2010 年 5 月の時点で Loading1 から 10 まで 10 回の試験が行われている。Table 3 に終 了した試験及び予定されている LOCA 試験を示す。

Fig14 及び 15 に PWR 及び BWR 燃料の LOCA 試験結果をそれぞれ示す。どちらの LOCA 試

験においてもバルーニング及びバーストが観察されている。バルーニングは内圧計の指示値が 下がり始めることで検出でき、内圧計の指示値の突然の降下及びガンマモニタの指示値の上昇 によりバーストが検出される。ここに示した PWR 条件の試験結果では燃料棒最大内圧はブロー ダウン後 260 秒後に約 7MPa(70bar)に達している。バースト時は被覆管温度約 1100℃、内圧 50bar で、ブローダウン後約 340 秒に観察されている。BWR 条件の試験では、燃料棒最大内圧はブロ ーダウン後 190 秒で約 1.1MPa(11bar)に達している。このときの被覆管周方向応力は約 5.5MPa。 バースト時は被覆管温度約 1100℃でブローダウン後約 250 秒で観察されている。Fig.16 に示す ように、バースト時の温度及び被覆管周方向応力は他機関の試験と比較した時に良い一致を見 せているということが報告されている。また PIE としてガンマスキャンや外観検査により燃料 棒及び燃料の変形が観察され、その後エポキシ樹脂を充填し燃料を固定して断面を観察してい る。Loading 5 におけるガンマスキャン結果及び燃料のひび割れの観察結果を Fig.17 に示す。

2.1.4 リフトオフ試験

高燃焼度燃料になるとFPガス放出が増大することで冷却材の圧力よりも燃料棒内の圧力のほうが大きくなる可能性がある。この現象をリフトオフという。リフトオフは燃料被覆管のギャップを増大させるので、燃料の温度はさらに上昇しFPガス放出がさらに増大する。リフトオフ 試験ではこの現象についての詳しい燃料ふるまいを総合的に研究する試験である。¹⁴⁾

リグの模式図を Fig.18 に示す。試験燃料は圧力フラスコ内に設置され、任意の冷却水条件化 (PWR,BWR,VVER)にするために圧力フラスコは水ループに接続されている。燃料棒に装荷さ れる計装は燃料中心温度計及び被覆管伸び計である。燃料棒の両端は超高圧ガスループに接続 され、燃料棒の内圧をコントロールすることができる。また超高圧ガスループは加圧だけでな く、ガス置換及びガンマスペクトロメーターを用いたガス分析が行える。圧力フラスコの周り にはブースターロッドが設置され高速中性子束を高くしている。その他の計装として入口出口 温度計及び中性子束検出器が圧力フラスコ内に設置されている。

試験は、超高圧ガスループで試験燃料棒内圧を増加させた状態で照射を行う。内圧は段階的 に増加させていく。各内圧の保持時間は各段階で燃料温度の変化を観察するために十分に長い 時間保持する。Fig.19に燃料棒内圧の変化と冷却水圧力の試験中の履歴を例示する。

ハルデンにおける最初のリフトオフ試験の結果を Fig.20 及び 21 に示す。Fig.20 中の上部のグ ラフは燃料棒内過圧と線出力をあらわしている。下のグラフは出力 15 k W/mに標準化した燃料 中心温度を示している。Fig.21 に標準化した燃料中心温度の 1000 時間あたりの温度増加を燃料 棒内過圧に対してプロットしている。これらの結果から、この試験では燃料棒内過圧が 13.8± 0.9MPa(+138±9bar) 以上からリフトオフ現象が起こっていたと考えられる。Fig.22 に出力上昇 時の被覆管伸び計の計測結果と計算から求めた熱膨張による被覆管の伸びを示す。これよりリ フトオフが起こった後でも弱い PCMI があることがわかった。一方、リフトオフ時の燃料温度 上昇を燃料のスエリングと燃料棒内過圧による被覆管クリープアウトの差から計算した燃料-被覆管ギャップを元に計算で求めたものは実験結果と良い一致を見せていると報告されている。 以上より、リフトオフ試験時の燃料ふるまいは燃料のリロケーション等が複雑に影響し正味の ギャップが増大することで、燃料温度が上昇したと考えられる。またリフトオフ試験シリーズ は商用炉で照射済みの PWR 用燃料、BWR 用燃料及び VVER 用燃料を使用して行われている。

2.1.5 被覆管クリープ試験

被覆管のクリープ特性は燃料ふるまいに強く影響する、たとえば、リフトオフ時や PCMI 時の被覆管の挙動などが例としてあげられる。そこで被覆管のクリープ特性を炉内照射環境で研究するための試験が行われている。^{15)、16)、17)、18)}

試験リグの模式図を Fig.23 に示す。試験燃料は圧力フラスコ内に設置され任意の冷却水条件 化におかれる。(PWR,BWR,VVER)。燃料棒に直径ゲージが装荷され、直径ゲージを駆動させる 装置と直径ゲージの位置を検出する装置が装荷される。この直径ゲージは測定毎に校正が必要 なため定直径の端栓が燃料棒の端に装着される。燃料棒はガスループに接続され、燃料棒の内 圧をコントロールすることできる。また中性子束検出器は圧力フラスコ内に装荷される。圧力 フラスコの周りには高速中性子束を上昇させるためにブースターロッドが装荷される。

試験燃料棒内の内圧を変化させることにより周方向応力を生じさせる。この応力が被覆管の 直径を変化させる。生じた周方向応力をが一定に保っている間に定期的に直径ゲージにて被覆 管の直径を計測する。直径の変化率からクリープ速度が求められ、定常クリープが観察された クリープ速度を測定するのに十分な直径データを取得すると周方向応力を変化させ、再度直径 変化を計測していく。周方向応力は外周方向(内圧>外圧)及び内周方向(内圧<外圧)の両 方の応力が適応される。このサイクルを何度も繰り返し、それぞれの周方向応力において直径 変化からクリープ特性を取得している。

ジルカロイ-2被覆管の試験では、14410時間の照射時間内に9つの異なった周方向応力が適応され、直径計測は約200回程度行われた。Fig.24に示すように、周方向応力を変化させるとそのたびにステップ状に直径が変化することがわかった。また各応力での結果からジルカロイ-2の遷移クリープ速度及び定常クリープ速度を得ている。Fig.25にその代表例を示す。被覆管クリープ試験はジルカロイ-4についても行われておりFig.26に示すようにジルカロイ-4の遷移クリープ速度及び定常クリープ速度を得ている。これらの試験結果よりFig.27に示すように、遷移クリープひずみは応力に比例するという結果が得られている。また被覆管クリープ試験はジルカロイ-4だけではなく最新の改良被覆管(E110,M5,MDA)に対しても実施されていることが報告されている。

2.2 材料照射試験

商用炉の高経年化対策及びさらなる長期供用のために、放射線環境下での構造材料の健全性 評価などが必要となっている。またプラント内の水化学条件の最適化など、構造材料に係る照 射試験は近年重要になってきている。これらの要求を受け近年 HBWR ではいくつかの材料試験 が行われておりそれについてまとめた。

2.2.1 き裂進展試験

照射誘起応力腐食割れ(IASCC: Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking)は、中性子照 射の影響(照射損傷)が炉内構造材料に蓄積することに起因して発生する応力腐食割れ(SCC) 現象である。そしてこの現象は構造材の長期健全性に関して非常に重要な問題の一つである。 そのメカニズムの解明のためにき裂進展試験が行われている。^{19,20)} Fig.28 にリグの模式図を示す。テストリグは水化学環境に変化を加えるために水ループに接続 されており、高い高速中性子束を得るためにブースターロッドが使用される。試験片には CT 片 を用いて、き裂の長さを直流電圧降下法にてオンライン計測する。CT 片はベローズを用いた応 力付加装置が装荷され、負荷が加えられえる。リグに装荷される計装は、入口出口温度計、ガ ンマサーモメーター2 台、中性子束検出器、そして、ECP センサーがリグの上部に装荷される。

照射試験が開始されると CT 片はガスフローシステムを利用して、一定の応力もしくは定期的 に変化する応力が適用され、き裂長さの変化からき裂進展速度を求める。BWR 及び PWR 条件 化の試験条件を Table 4 に示す。速中性子束は 2.5~3.0×10¹³ n/cm²s (>1MeV)程度である。

BWR条件下での試験からき裂進展速度と応力拡大係数K値の関係がFig.29に示すように得ら れている。このときき裂進展速度のK値への依存性はK²であることが報告されている。水化学 条件を変化させた時に、低照射量の試験片では水環境の変化によりき裂進展速度が遅くなり、 高照射量の試験片ではき裂進展速度が変化しないことが確認された。この結果をFig.30に示す。 また腐食電位とき裂進展の関係としてFig.31に示すような結果が報告されている。Fig.31中の シンボルのうち塗りつぶしシンボルがハルデンで得た結果である。また左のグラフが低照射量 試験片、右が高照射量試験片から得られた結果である。これより低照射量試験片に関しては腐 食電位を低くするとき裂進展速度が低くなるが、高照射量試験片ではき裂進展速度が変化しな い結果が得られている。またこれらは他の研究とも同様な結果を示している。

PWR 条件下での試験からは、き裂進展速度は Fig.32 及び 33 に示す結果が報告されている。 Fig.32 より K 値が一定であればき裂進展速度も一定であり、Fig.33 よりき裂進展速度の K 値へ の依存性が K^{2.6}であることが報告されている。また腐食電位とき裂進展の関係を Fig.34 に示す。 PWR 条件では冷却水温度が高いためにき裂進展速度が速くなることが報告されている。

2.2.2 照射下クリープ及び照射誘起応力緩和試験

商用炉で用いられている一般的なオーステナイトステンレス鋼についての照射下におけるク リープ及び応力緩和のふるまいを研究するための試験が行われている。^{19,21,22)}

試験リグに装荷されるテストユニットの模式図を Fig.35 に示す。テストユニットには加負荷 装置及び試料伸び計が装荷されており、試験片はユニット内に設置される。加負荷装置は外部 ガスラインと接続されてガス圧をもちいて試料に負荷を加える。伸び計は LVDT を使用した伸 び計である。試料の雰囲気温度はテストユニット内に設置されている熱電対で計測され、He-Ar の混合ガスにより雰囲気温度がオンラインコントロールされる。

公開されている照射クリープ及び照射応力緩和試験の試験状態を Table 5 に示す。ここで Material の CW は冷間加工を意味し、SA はアニール処理を意味する。Test type の Qualification とは、この試験片を使用して、照射試験中の伸び計の挙動の確認を行うためのものである。ま たこの試験の目標照射量は 2.0dpa である。

目標照射量の 1/3 程度の照射が行われた時点での結果が報告されている。Qualification 試料 (CW316SS)の結果より、試料の直径は照射クリープが無視できるほど大きいため試料の長さ は一定の長さを保つはずであるが、試料長さが増減することが観察された。これは炉出力、試 料温度、高速中性子束もしくは応力が変化したときに観察された。これを Fig.36 に示す。また 試料の長さはステップ状の変化を示し、かつ変化にはしきい値があることもわかった。 Fig.37 にクリープ試験ユニットからの結果を示す。この図中の破線が温度標準化処理をした試料長さを、実線はクリープ式を用いて作成した回帰曲線である。これらの結果から、CW316SSの一次クリープ及び二次クリープを観察できた。またここであらわれたクリープ速度は他の実験結果ともよく一致した結果となることが報告されている。

応力緩和ユニットからは Fig.38 及び Fig.39 に示す結果が得られている。Fig.38 より試料長さの変化により応力緩和が観察されていることがわかる。Fig.39 中の unit1 と unit2 の結果よりそれぞれの試験片がほぼ同じ応力緩和をすることから、CW316SS の応力緩和には初期の応力は関係ないことが報告されている。

2.2.3 き裂発生試験

応力腐食割れ(SCC)現象を更なる理解を得るために、照射場において試験片に張力をかけて き裂発生に影響を与える因子及びメカニズムを解明するための試験である。^{19,22)}

Fig.40に試験片及び負荷装置の模式図を示す。試験片は対で試験装置に装荷され、試験装置は 試験リグ内に 15 個装荷され照射される。試験片の破断は試験装置の下部に設置されている LVDT にて検出される。試験片はリグ外部のガスフローシステムによりベローズを用いて張力が 付加される。試験片が破損すると Fig.40 に示すように検出のためのベローズがつぶれ LVDT 内 のコアが動き、破損を検出する。試験中は照射後降伏応力の76~97%に該当する張力がか けられる。Fig.41 に試験片が破損したときの計測結果を示す。この図からは張力を増加させた後、 試験片が破損していることがわかる。試験に用いられている試験片は商用炉の制御棒で使用済 みの 304LSS を用いて作成された試験片を使用した試験においては 10000 時間までの照射時間内 に 5 つの試験片が破損している。Fig.42 に示すように破損が起きたのは 550 時間から 8000 時間 のあいだで降伏応力の 75 から 85%の間で起こっている。今後の予定としては BWR 条件下のう ち水素を添加した水条件の試験が準備されているようである。

2.2.4 燃料被覆管腐食試験

商用炉運転条件は昔と比べると、燃料の高燃焼度化、主力密度の増加及び冷却水の高温度化 などに伴い厳しくなっており被覆管の腐食は重要な項目となっている。特にクラッドが被覆管 に堆積すると AOA(Axial Offset Anomaly)が起こりやすくなり、最悪の場合、被覆管が破損す ることもある。このため被覆管の腐食及びクラッド堆積を引き起こす要因について調べるため に試験が行われている。^{23)、24)}テストリグは PWR 条件を模擬するために水ループに接続されて おり、水化学条件を任意に変更できるようになっている。被覆管のクラッド堆積のデータは原 子炉停止時毎に被覆管の直径を測定する方法と、照射中に直径ゲージにて被覆管の直径を測定 する 2 つの方法から被覆管のクラッド堆積のデータが得られている。後者に関しては、被覆管 クリープ試験のデータを流用している。

Table 6 に熱条件、水条件及び計測された最大クラッド厚さを示す。Table 7 に長期にわたり照 射された被覆管腐食試験の条件等を示す。Test 5 のケースが直径ゲージを使用した試験であり、 その他のケースは原子炉停止毎に被覆管の観察及び計測が行われている。

試験結果として、Test 2 では上下に分割されたテストロッドが使用された。この上下のテスト ロッドは濃縮度の違う燃料を装荷しており(上側 6.5、下側 10w/o U-235)、燃料のないコネクタ でつながれている。測定結果を Fig.43 に示す。45 日後の測定ではテストロッド上下の堆積物の

層の厚みは同じだったが、160日後では下側のテストロッドのほうが堆積物層は厚くなった。こ のことから線出力が高いと堆積物も厚くなることが報告されている。また、燃料を装荷してい ないコネクタには堆積物はほぼ観察されず、各燃料ペレットの端で堆積物層が小さくなり各燃 料ペレット中心で堆積物層は最大になることから、熱流速(線出力)が堆積物に影響すること がわかった。Test3ではテストロッドの下から3分の1には低濃縮燃料、上の3分の2には高濃 縮の燃料が装荷された。この濃縮度の違いによりロッド上方と下方では単層流、上方ではサブ クール核沸騰流となる。Test3の Phase 1 では PWR 条件下で試験が行われクラッドの堆積は観察 されなかったが Phase 2 ではロッドの出力と冷却水の入り口温度を高くし、さらに水条件の変化 として、Fi と Ni のレベルを上昇させて試験が行われた。この条件の変化により、サブクール核 沸騰流条件下(ロッドの上方3分2)においては、厚いクラッドの堆積が観察されたが、単層流 条件下ではクラッドが堆積されなかった。上下に違いが出た Phase 2 の試験時の外観写真を Fig.44 に示す。Test5は被覆管クリープの試験なのだが、Test4 と同じ水ループを同時に使用し て行われた試験のため、水化学条件は同様である。この試験は直径ゲージにてオンライン計測 が行われた。この試験では亜鉛注入後に被覆管直径が急増することが観察された。また原子炉 停止時に被覆管直径が減少することが観察された。これは原子炉停止に伴う冷却水温度の変化 等により、クラッドが溶解したことを示している。

長期間の試験からも上述の試験と同様の現象が観察されている。測定結果を Fig.45 に示す。 時間とともに酸化層が増えていく様子が分かる。長期照射試験及び様々な被覆管腐食試験より、 熱流束のある被覆管部にはクラッドが堆積することが確認された。被覆管の熱水力条件(伝熱 状態)が厳しくなると Fe と Ni の水中濃度が普通でも強固なクラッド層が生成する。そして化 学物質の注入(亜鉛等)によりクラッド層の堆積速度が速くなることがあること等が判明した。

3.炉内計装装置

HBWR で行われている照射試験では様々な炉内計装が適用されており、この炉内計装は各種の試験データをオンラインかつオンタイムで取得することを可能にしている。この炉内計装はハルデンのワークショップで製作されているものである。以下に現在のハルデンで用いられている主な計装装置及び現在開発されている計装装置について公開されている文献を参考にしてまとめた。^{25)、26)、27)}

3.1 炉内計装装置

ハルデンで主に使われている炉内試験用の計装を Table 8 に模式図を Fig.46~50 に示す。

Fig.46 に示される、タービン流量計は Rotor の羽根が pickup coil 部を通過するごとに発生するパルスを計測してリグ入口での冷却水流量を計測する装置である。この装置は故障を起こした場合は取替えがいつでも可能なのが特徴の一つである。

機械的な直線変位量を電気信号に変える LVDT は、圧力及び伸びを計測する計装にはすべて 用いられていることから特に主要な計装装置であるといえる。ハルデンで開発された LVDT の5 年後の故障率は 10%以下であり、その計測精度は±1µmである。Fig.47に模式図を示す。

内圧計はベローズ、エンドプラグ、LVDTから構成されており燃料棒内のガス圧力を計測する 装置でる。一般的な物として最大計測可能圧力が 1.5MPa、3MPa、7MPa(15bar、30bar、70bar) の3種類がありその精度は1.5MPa で0.02MPa(15bar で0.2bar)及び7MPa で0.05MPa(70bar で0.5bar)である。

燃料中心温度計には熱電対と熱膨張温度計の2種類がある。熱電対型はタングステンーレニ ウム型である。この型の熱電対は中性子束の影響で感度が変化するため使用開始後に再度校正 が必要になる。このため現在アイダホ国立研究所(INL)との共同研究で中性子断面積の小さな熱 電対を研究している。熱膨張温度計はタングステンの温度変化による膨張を LVDT で計測し温 度に変換している。Fig.47 に熱膨張温度計の模式図を示す。

被覆管伸び計 及び燃料伸び計は同じ原理の計装装置である。燃料もしくは被覆管と直接接しているコア付エンドプラグの変位を LVDT を用いて計測している。

ガンマサーモメーターはFig.49に示すようにハウジングのガンマ発熱をXeガスと熱電対を用いて測定している。

直径ゲージは LVDT の原理を応用して開発された計装である。被覆管の直径変化に応じて、 Fig.50の接極子が動きその動きに応じて 2 つの 2 次コイルの信号が変化する。この変化を直径の 変化として計測する。

腐食電位を測定する ECP センサーは白金電極型、パラジウム電極型、鉄・酸化鉄電極型が HBWR では使用されている。また電極に Pt と Pd を用いた 2 種類の ECP センサーが開発されており、 現在開発中の物もあるため次節にてもう一度述べたい。

3.2 計装装置の開発

照射試験のニーズに合わせて現在も計装装置の開発が行われている。すべての開発中の計装 装置は照射試験中にオンライン計測を実施するために行われている。

3.2.1 被覆管酸化膜厚さ計測装置の開発

渦電流探傷の原理を利用した酸化膜厚測定技術の開発が行われている。求められる要件として 酸化膜厚さが100マイクロまで測定可能なものを開発中である。Fig.51に開発中の測定器の模式 図を示す。ハウジングは AISI316 製でプローブは2つ付いている。参照プローブがへこんでい るのは温度変化による信号変化を補正するためである。

室温での試験では計測信号の線形性が確認されており、次は高圧高温での炉外試験の予定が あるようである。室温での試験時には信号ケーブルを18m として試験が行われており、分解能 は1µmであった。

3.2.2 ECP センサーの開発

ECP 測定用電極の作成において技術的に困難な部分は金属部分とセラミックス部分の間のシ ール作成にある。ろう着でシールを施工した Pt 電極が開発された。メカニカルシールではなく ろう着でシールを作成したため電極の直径を従来よりも 7mm小さくすることに成功している。 炉外の試験で 15MPa(150bar)、350℃の条件でテストが行われ、ろう着シールが破損しないこと が確認されている。Fig.52 及び 53 に模式図及び写真を示す。

もう1つの ECP 用電極の開発として、鉄・酸化鉄電極をメカニカルシール及びろう着シール の2種類のシール方法で開発された。メカニカルシール使用の電極のセラミックスのチューブ には普通はイットリア安定化ジルコニアが用いられるのだが、今回はマグネシア安定化ジルコ ニアが用いられた。これはマグネシア安定化ジルコニアのほうが破壊靱性及び耐力が強いので メカニカルシールとしてより有効であるからである。ろう着シール使用の電極にはろう着のし やすさの観点からイットリア安定化ジルコニアが用いられている。Fig54及び55に写真を示す。

3.2.3 その他の計装装置の開発

ハルデンでは現在使われている計装装置に関して、第4世代原子炉(超臨界水)や高速炉条件での試験に用いる事を目的として LVDT について開発が行われている。この開発では、陽極酸化アルミ(anodized aluminum)を LVDT のワイヤーに使用することで、高温域(550℃)で使用可能な LVDT が開発されている。ガス圧計圧力においては LVDT に変位を伝達するためのベローズを直列に2つ連結させることで、さらに高圧域での測定が可能なガス圧計が開発されている。燃料中心温度計においては中性子吸収断面積の小さい材料での温度計を開発中である。 直径ゲージに関しては鉄心の形状を変更することで計測信号の線形性をよりよくすることに成功している。

4. まとめ

以上ハルデンプロジェクトで行われている照射試験のうち合同試験計画について公開文献 を参考にしてまとめた。照射試験については燃料、材料及び水化学の分野に関して照射試験が 行われている。そのうち燃料の分野に関しては燃料の総合的なふるまいを観察する試験及びリ フトオフやLOCAといった異常過渡状態に関する試験が使用済みの高燃焼度燃料に対して行わ れており、また燃料及び被覆管の基礎的な特性を観察する試験も行われている。そしてこれら の試験から得られた結果は、計算コードの改良に役立てられていた。材料分野に関しては高経 年化がはじまった原子炉内の構造物に関して、き裂進展、クリープ特性、破断限界等の健全性 に関わる問題に関しての試験が行われている。水化学の分野に関しては主に被覆管の健全性に 関して水化学条件の関係を調べる試験が行われている。また以上の試験を支えている計装装置 は耐久性、測定精度及び形状に関してさらなる改良が行われている。とくに今後はさらなる高 温高圧下での計装装置の開発が行われている。

以上、本報告書でまとめられた情報は、JMTR の軽水炉分野における照射ニーズに対応するための照射技術の高度化に有用な情報である。

謝辞

本報告書の作成にあたり、大洗研究開発センター 照射試験炉センター 鈴木雅秀 センター長 及び材料試験炉部 小森芳廣 部長に有意義なご指導及びご助言を頂きました。また、本報告書 をまとめる上で照射試験炉センター 石原正博 副センター長及び照射試験炉センター 神永雅 紀 副センター長のご助言を頂きました、さらに、材料試験炉部・楠剛次長及び照射試験炉セン ター照射試験開発課中村仁一研究副主幹のご助言を頂きましたことを深く感謝いたします。

また資料提供に際し Margaret McGrath 氏及びハルデンプロジェクト職員諸氏にご協力を頂き ましたことを深く感謝いたします。

参考文献

- 1) IAEA : Nuclear Research Reactors in the World available from http://nucleus.iaea.org/RRDB/RR/ReactorSearch.aspx (accessed 2011-10-15)
- Institute for Energy Technology "Safety analysis report, Halden boiling water reactor part 1 description" April 2006 IFE
- 3)Volkov, B. "Integral approach to innovative fuel and material investigations in the Halden reactor" 8th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support, Helena Resort near Burgas (Bulgaria), 2009-09-26--10-04
- 4)Kolstad,E. "LOCA-experiment med högutbränt bränsel i Haldenprogrammet" Forskningsseminarium Reaktorsäkerhet, Aronsborg, Stockholm, 2010-04-22--04-23
- 5)Kolstad,E. McGrath,M. "Fuel performance experimental research" IPG meeting- Workshop on Fuel Behaviour ANL, USA, 2008-09-08--09-19
- 6) ハルデン共同研究合同運営委員会 "ハルデン計画"
- 7) Volkov.B "investigation of large grain and Gd-doped WWER fuels behaviour at BOL in the Halden reactor" 7th international conference on WWER fuel performance modeling and experimentl support Albena, Bulgaria 17-21 September 2007
- 8) Institute for Energy Technology "Annual report 2009"
- Volkov.B "Integral approach to innobative fuel and material investigation in the Halden reactor" 8th international conference on WWER fuel performance modeling and experimentl support , Bulgaria 26 September 2009
- 10) Schubert, A., Gyori, C., van de Laar, J., Bznuni, S., Safaryan, T., Tverberg, T., Kim, J.-C., van Uffelen, P. "Verification of the TRANSURANUS burn-up model for WWER fuel and (U,Gd)O2 fuel" International Conference on the Physics of Reactors, Interlaken (Switzerland), 2008-09-14--09-19
- S.K.Yagnik, T.Tverberg, E.Kolstad, J.A.Turnbull, D.Baron, M.Kinositha "Fuel (UO2) R&D: Needs,
 Approaches, and Results" 2008 Water Reactor Fuel Performance Meeting October 19~23, 2008,
 Renaissance Seoul Hotel, Seoul, Korea www.wrfpm2008.org Paper No. 8085
- 12)Kolstad.E `LOCA experiment med högutbränt bränsle i Haldenprogrammet` Forskningsseminarium Reaktorsäkerhet, Aronsborg, Stockholm, 2010-04-22--04-23
- 13) Wiesenack, W., Kolstad, E., Oberländer, B "Recent results from the Halden Reactor Project LOCA experiment programme" Japan Atomic Energy Agency Fuel Safety Research Meeting, Tokai,

2010-05-19--05-20

- 14)Wisenack.W Tvererg.T Mcgrath.M Kolstad.E Beguine.S "Rod overpressure/lift-off testing at Halden In-pile data and Analysis" Journal of nuclear science and technology Atomic society of Japan
- 15) Kolstad.E McGrath.M "fuel performance experimental research" IPG meeting- workshop on Fuel Behaviour 2008
- 16)J.P.Foster McGrath. M "In reactor creep behavior of Zircaloy-2" LWR Fuel Performance Meeting/Top Fuel, San Francisco, 2007-09-30--10-03
- 17) Weisenack. W "Application of research reactor to irradiation of nuclear fuels and materials" HANORO Symposium, Daejeon (South-Korea), 2010-11-01--11-02
- 18) Wisenack.W Tvererg.T "The OECD Halden reactor project fuels testing programme : methods, selected results and plans" Nuclear Engineering and Design 207 (2001) 189–197
- Bennett, P Karlsen, T, M "In-core corrosion monitoring in the Halden test reactor" Energy materials: Materials science and engineering for energy systems, Vol. 3, no. 2 (June 2008), 81-90
- 20) Karlsen, T.M., Bennett, P.J., Høgberg, N.W In-core crack growth rate studies on irradiated austenitic stainless steels in BWR and PWR conditions in the Halden Reactor" International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems - Water Reactors, 12, Salt Lake City, 2005-08-14--08-18
- 21) FosterJ.P Karlsen.T.M "Irradiation creep and irradiation stress relaxation of 316 and 304L stainless steel" International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems
 Water Reactors, Virginia, 2009-08-24--08-28
- 22) T.M. Karlsen, P. Bennett, N-W Høgberg, R. van Nieuwenhove "Test facilities and on-line instrumentation capabilities for core component materials investigation at the HALDEN reactor project" available from <u>http://www.asn.fr/fichiers/nupeer/2/2_4D_KAR.PDF</u> (accessed 2011-10-15)
- 23) Bennett, P. "Effect of water chemistry and thermal-hydraulic conditions on crud formation on PWR fuel in the Halden reactor" International Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems, Berlin, 2008-09-15--09-18
- 24) Bennett, P. "Crud formation on low duty PWR fuel in Halden reactor" Nuclear Power Plant Chemistry Confrence (NPC), Quebec City, 2010-10-03--10-07
- 25)Steinear Solstad Rudi Van Nieuwenhove, "Instrument capabilities and developments at the Halden reactor project" American Nuclear Society International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies, 6. NPIC&HMIT 2009, Knoxville, Tennessee, 2009-04-05--04-09
- 26) Van Nieuwenhove, R. Solstad, S. "In-core fuel performance and material characterization in the Halden Reactor" IEEE transactions on nuclear science, Vol. 57, no. 5 (Oct 2010), 2683 2688
- 27) Steinear Solstad Rudi Van Nieuwenhove, "Instrument capabilities and developments at the Halden reactor project" Sixth International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies. Nuclear technology, Vol. 173, no. 1 (Jan 2011), 78-85"

炉型	沸騰水タンク型(運転時圧力 3.33MPa(33.3bar) 240℃)
冷却材・減速材	重水
熱出力	20MW
反射材	重水
制御棒	30% カドミウム 70% 銀 合金 (総数は30本)
熱中性子束(Max.)	$1.50E+14 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
高速中性子束(Max.)	$0.80E+14 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

Table 1 HBWR 諸元

Table 2 ディスク試験シリーズ試験条件等¹¹⁾

IFA	Fuel	Instrumentat	Disc diameter	Diametral gap		
(program)	Variantants	ion	ion Fuel		(µ m)	
IFA-569	UO ₂ , Gd-doped	NDs, TFs	10 x 1	10.32 x 3	350	
(NFIR)		and GFs				
IFA-563	UO ₂ , Gd-doped	NDs, TFs	9.9 x 1	10.35 x 2	300	
(HPG)		and GFs				
IFA-601	UO ₂ ,	NDs, TFs	5 x 1	(7.76-8.26)	100-200-350-600	
(HBRP)	Gd-,Ce-,Mg-doped	and GFs		х		
				(1.2-3.0)		
IFA-649	UO ₂ ,	NDs, TFs	8.2 x 1	(10.37-10.57)	100-150-200-250-300	
(NFIR)	Cr-doped,MOX,	and PFs		х		
	soft-pellets, and			(1.7-2.3)		
	ZrB ₂ coated					
IFA-655	UO ₂ and MOX	NDs, TFs,	8.2 x 1	10.55 x 1	100 and 250	
(HPG)		PFs, EFs,		10.40 x 1		
		and GFs				

	type	burnup MWd/kg	clad	treat- ment	oxide µm	PCT ℃	pres. bar	when
1	PWR	0	comr	nissioning	g test	1100	1	
2	PWR	0	comr	nissioning	g test	850	40	
3	PWR	82	Zry-4	SRA	24-27	850	40	
4	PWR	92	Zry-4	SRA	10-11	850	40	
5	PWR	83	Zry-4	SRA	65-80	1100	40	
6	VVER	55	E110		~5	850	30	4/2007
7	BWR	44	LK3/L		<10	1150	6	4/2008
8	PWR	0	comr	nissioning	g test	1100	1	12/2008
9	PWR	90	Zry-4	SRA	7-8	1100	40	4/2009
10	PWR	61	Zry-4	SRA	20-30	850	40	5/2010
11	VVER	55	E110			1000	30	10/2010
12	BWR	72	LK3/L			<800	low	2011
13	BWR	72	LK3/L			<800	low	2012

Table 3 LOCA 試験シリーズ条件一覧¹³⁾

Table 4 き裂進展試験条件

試験	冷却水	冷却水	冷却水	冷却水化学条件 读中性子声		
タイプ	温度	圧力	流量		迷中性于床 	
				6~7ppmO ₂	0.07 µ S/cm 入口	$2.5 \sim 3.0 \times 10^{13}$
BWR	200°C	001	500/1		0.2 <i>µ</i> S/cm 出口	n/cm ² s
試験	280 C	900ai	50e/n	$\sim 2 ppmH_2$	0.07 μ S/cm 入口	(>1MeV)
					0.1 µ S/cm 出口	
				2~3ppm H ₂	o. 22 S/am	
PWR	2250	165hor	150 0/h	2ppmLi/1200ppmB	23μ S/cm	
試験	333 C	1030a1	130 %/11	2~3ppm H ₂		
				3ppmLi/1000ppmB	$\sim 20 \mu$ S/cm	

Table 5 試験条件²¹⁾

			1				
Material	Unit*	Sample Type	Stress (MPa)	T (°C)	Test Type		
CW 316 SS	1	Rod	275	330	Stress Relaxation		
CW 316 SS	2	Rod	205	330	Stress Relaxation		
CW 316LN SS	3	Tube	345	330	Creep		
CW 316 SS	6	Rod	28	330	Qualification		
SA 304L SS	7	Tube	110	290	Creep		
SA 304L SS	8	Tube	92	290	Creep		
CW 316 SS N lot	9	Tube	345	370	Stress Relaxation		
CW 316 SS	11	Rod	345	330	Creep		
CW 316 SS	12	Rod	345	330	Creep		
*The instrumentation for unit 10 malfunctioned							

Table I. Instrumented sample test matrix.

*The instrumentation for unit 10 malfunctioned.

Table 6 被覆管腐食試験条件²³⁾

Table 1. Summary of	of thermal-hydraulics	and water	chemistry	conditions
---------------------	-----------------------	-----------	-----------	------------

Parameter	Test 1	Test 2	Test 3,	Test 3,	Test 4	Test 5
			Phase 1	Phase 2		
Time at power, days	1000	160	160	120	267	500
Void fraction	0-0.05	0.13	0.012	0.01 - 0.022	0.05	0.12 - 0.19
Inlet temperature (°C)	305 - 310	322	290	294	317	310
Temperature rise (°C)	6 -10	7	24	30 - 35	13	10
ALHR (kW/m)	15 - 34	30 - 40	16 - 34	30	26 - 34	40 (mean)
Heat flux (kW/m ²)	500 - 1140	890 - 1180	455 - 855	980	870 - 1180	1180 (mean)
LiOH, ppm	3.0	3.2 / 2.2*	3.15	3.15	2.3	2.3
B, ppm	1000	992 / 290*	1400	1400	1170	1170
pH ₃₀₀	7.1	7.1 / 7.4	7.0	7.0	6.93	6.93
Soluble Fe, ppb	5	0.1 - 27	3.5	15	3-15	3 - 15
Soluble Ni, ppb	0.15	0 - 1.4	0.3	2	< 0.5	< 0.5
Soluble Zn, ppb	< 1	< 1	< 1	< 1	50	50
Max crud thickness,	0	20	0	500	(2)**	65***
μm*						

Measured during PIE *

** Crud formed in localised regions, not full surface coverage *** Measured in-core, at power

Table 7 被覆管腐食試験サイクル毎試験結果²⁴⁾

Cycle No		1	2	3	4	5	6	7	8
FPD		52	66	66	78	96	105	157	59
Inlet/Outlet coolant temperature (°C)		310 317	310 316	306 316	310 318	307 315	300 308	300 310	305 314
Maria Provide and Area	1	0.39	0.17	0.4	49	0.71	0.44	0.38	0.26
cladding segment N ⁰	2	0.41	0.15	0.4	45	0.64	0.39	0.37	0.25
	3	0.31	0.04	0.2	28	0.42	0.23	0.22	0.14
	4	0.13	0.00	0.0	00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interim inspections			1		2		3		4
Cycle No		9	10	1	1	12	13		14
FPD	FPD 136 §		97	8	В	96	81		76
Inlet/Outlet coolant temperature (°C)		310 316		310 316			310 320		
Maid for stars Miller	1	0.00	0.00	0.0	00	0.0004	0.00		0.00
cladding segment N ^o	2	0.0012	0.0019	0.00)15	0.0019	0.001	0	0.00
	3	0.0012	0.0018	0.00)14	0.0018	0.001	0	0.00
	4	0.00	0.00	0.0	0	0.00	0.00		0.00
Interim inspections					5				6

Table 1. Overview of irradiation

種類	用途				
タービン流量計 Turbine Flow Meter	出力校正を行うためにリグ内の冷却水の流量を計測する 装置				
LVDT Linear Variable Differential Transformer	機械的な直線変位を電気信号に変える計装装置				
内圧計 Pressure Transducer	燃料棒内圧を計測する装置				
燃料中心温度計 Fuel Centerline Temperature	燃料の温度を計測する装置 熱電対型と膨張型の2種類が ある。				
被覆管伸び計 Cladding Elongation	被覆管の軸方向の伸びを計測する装置				
燃料伸び計 Fuel Elongation	燃料の軸方向の伸びを計測する装置				
ガンマサーモメーター Gamma Thermometer	ガンマ発熱を測定する装置				
直径ゲージ Diameter Gauge	被覆管の直径を測定する計装装置				
ECP センサー Electrochemical Corrosion Potential Sensors	リグ内の腐食電位を計測する装置				
き裂長さ計 Crack Growth Measurement	材料のき裂長さを測定する装置、 直流電位差法を用いて いる。				

Table 8 ハルデンで使用されている主な炉内計装装置



Fig.1 炉心配置図(上部より)¹⁾



Fig.3 燃料棒ガスフローシステム模式図³⁾







Fig.5 試験燃料模式図及び試験リグ断面図⁷⁾



Fig.6 照射初期における Gd 含有燃料の燃料長変化及び体積変化⁹⁾



Fig.7 測定温度及び FTEMP3 コード計算による燃料温度⁹⁾



Fig.8 試験燃料模式図¹¹⁾





Fig.10 R/B 及び S/V 計測結果¹¹⁾



Fig.11 LOCA テストリグ縦断面図¹²⁾



Fig.12 テストリグ横断面図¹²⁾



IFA-650.4 Cladding ballooning burst indications



Fig.14 PWR 条件時試験結果¹²⁾







Fig.17 LOCA 試験後のガンマスキャン図及び断面写真¹²⁾



Fig.18 リフトオフ試験用リグ模式図¹⁴⁾



Fig.19 燃料棒内部圧力及び冷却水圧力履歴¹⁴⁾



Fig.20 試験燃料棒内部圧力と燃料中心温度履歴¹⁴⁾



Fig.21 リフトオフ試験の 1000 時間あたりの燃料温度増加¹⁴⁾



Fig.22 出力変動時の被覆管長さの変化¹⁴⁾



Fig.23 被覆管クリープ試験リグ模式図¹⁵⁾



Fig.24 被覆管クリープ試験における被覆管直径変化履歴¹⁸⁾



IFA-585 Period BWR3 with Nominal Oxide Correction -159.4 MPa Hoop Stress, -217.7 MPa Hoop Stress Change

Fig.25 ジルカロイ-2直径変化から取得した遷移クリープ及び定常クリープ¹⁶⁾



Fig.26 ジルカロイ-4 直径変化から取得した遷移クリープ及び定常クリープ¹⁷⁾







Fig.28 き裂進展試験リグ模式図¹⁹⁾



Fig.29 き裂進展速度と応力拡大係数(BWR 条件)²⁰⁾



Fig.30 BWR 条件化試験時の水化学変化とき裂進展速度変化¹⁹⁾



Fig.31 腐食電位とき裂進展速度(BWR 条件)²⁰⁾



Fig.32 き裂長さと応力拡大係数 K (PWR 条件)²⁰⁾



Fig.33 き裂進展速度と応力拡大係数応力拡大係数(PWR 条件)²⁰⁾



Fig.34 腐食電位とき裂進展速度(PWR 条件)²⁰⁾



Fig.35 照射下クリープ及び応力緩和試験ユニット模式図²¹⁾



Fig.36 試料温度変化及び原子炉出力変化に伴う Qualification ユニットの長さ変化²¹⁾



Fig.38 応力緩和ユニット長さ変化¹⁹⁾



Fig.39 試験ユニット1及び2応力緩和試験結果²¹⁾



Fig.40 き裂発生試験用試験片及び負荷装置模式図¹⁹⁾







Fig.42 き裂発生試験における適応応力と時間²²⁾



Fig.44 冷却水条件の違いによる被覆管堆積物の違い外観写真²³⁾



Fig.45 堆積物厚さ測定結果²⁴⁾



Fig.46 タービン流量計²⁵⁾



Fig.47 LVDT 模式図²⁵⁾





Fig.50 直径ゲージ模式図²⁵⁾

JAEA-Review 2012-018



Fig. 51 酸化膜厚さ計測装置模式図²⁶⁾



Fig52	白金電極	(メカニカルシール)	26)
-------	------	------------	-----



Fig53 白金電極 (ろう着シール)²⁶⁾

JAEA-Review 2012-018



Fig54 鉄酸化鉄電極 (メカニカルシール)²⁶⁾



Fig55 鉄酸化鉄電極(ろう着シール)²⁶⁾

This is a blank page.

 表2.基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

 細カ島
 SI 基本単位

SI基本単位 名称 記号 長 さメートル m
並不量 名称 記号 長 さメートル m
長 さメートル m
質 量キログラム kg
時 間 秒 s
電 流アンペア A
熱力学温度 ケルビン K
物 質 量 モ ル mol
<u>光 度 カンデラ cd</u>

	- XH	1 5 7 1				
	形	1.11.	里		名称	記号
面				積	平方メートル	m ²
体				積	立法メートル	m ³
速	さ	,	速	度	メートル毎秒	m/s
加		速		度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波				数	毎メートル	m ⁻¹
密	度,	質	量 密	度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面	積		密	度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比		体		積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電	流		密	度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁	界	\mathcal{O}	強	さ	アンペア毎メートル	A/m
量	濃 度	(a)	, 濃	度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質	量		濃	度	キログラム毎立法メートル	kg/m ³
輝				度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈	护	ř	率	(b)	(数字の) 1	1
比	透	磁	率	(b)	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのこと を表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

			SI 組立単位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による 素1 ち	SI基本単位による 素しち
亚 面 催	ラジアン(b)	rad	1 ^(b)	m/m
	ステラジアン(b)	cr ^(c)	1 (b)	m^{2/m^2}
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz	1	s ⁻¹
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²
圧力,応力	パスカル	Pa	N/m^2	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	$m^2 kg s^{-3}$
電荷,電気量	クーロン	С		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{2} kg^{1} s^{4} A^{2}$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^1$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量,比エネルギー分与,	グレイ	Gv	J/kg	$m^2 s^2$
カーマ	· · ·	~	B	
線量当量,周辺線量当量,方向 性線量当量,個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	$m^2 s^2$
酸素活性	カタール	kat		s ^{'1} mol

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや コヒーレントではない。
 (b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (o)剤光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの 単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値にどちらの単位で表しても同じである。
 (f)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205)についてはCIPM勧告2(CI-2002)を参照。

表4.単位の甲に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	S. S.	I 組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ^{'2}
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ⁻³
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^2 K^1$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	・ジュール毎立方メートル	J/m^3	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ^{·3} A ^{·1}
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA
表 面 電 荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m ² sA
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
誘 電 率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{3} kg^{1} s^{4} A^{2}$
透 磁 率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー,モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^2 K^1 mol^1$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ^{'1} sA
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放 射 輝 度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表 5. SI 接頭語							
乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号		
10^{24}	э 9	Y	$10^{.1}$	デシ	d		
10^{21}	ゼタ	Ζ	$10^{.2}$	センチ	с		
10^{18}	エクサ	Е	10^{-3}	ミリ	m		
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ		
10^{12}	テラ	Т	$10^{.9}$	ナノ	n		
10^{9}	ギガ	G	$10^{.12}$	ピコ	р		
10^{6}	メガ	М	$10^{.15}$	フェムト	f		
10^{3}	キロ	k	$10^{.18}$	アト	а		
10^{2}	ヘクト	h	$10^{.21}$	ゼプト	z		
10^{1}	デ カ	da	10^{-24}	ヨクト	У		

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位						
名称	記号	SI 単位による値				
分	min	1 min=60s				
時	h	1h =60 min=3600 s				
日	d	1 d=24 h=86 400 s				
度	۰	1°=(п/180) rad				
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad				
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad				
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²				
リットル	L, l	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³				
トン	t	$1t=10^3 \text{ kg}$				

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

	表される数値が実験的に得られるもの									
	名	称		記号	SI 単位で表される数値					
電	子 オ	き ル	Ч	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J					
ダ	ル	ŀ	\sim	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg					
統-	一原子	質量単	〔位	u	1u=1 Da					
天	文	単	位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m					

	表8.SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位									
	名称		記号	SI 単位で表される数値						
バ	_	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa						
水銀	柱ミリメー	トル	mmHg	1mmHg=133.322Pa						
オン	グストロ・	- 4	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m						
海		里	М	1 M=1852m						
バ		\sim	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm)2=10 ⁻²⁸ m ²						
1	ツ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s						
ネ		パ	Np	ロ光伝しの粉はめた眼接は						
ベ		ル	В	51単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。						
デ	ジベ	ル	dB -	X19X ± 17 /C42(19) X110						

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位									
名称	記号	SI 単位で表される数値							
エルク	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J							
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N							
ポアフ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s							
ストークフ	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$							
スチルフ	sb	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{2} = 10^{4} \text{ cd m}^{2}$							
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm 2 10 ⁴ lx							
ガル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm s}^{-2} = 10^{-2} \text{ ms}^{-2}$							
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$							
ガウジ	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$							
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≜ (10 ³ /4π)A m ⁻¹							
(a) 2 元系のCCC留住たるしCIでけ声接比較できないため 焼品「 A									

3元系のCGS単位系とSI Cは は対応関係を示すものである。

			表	10.	SIに 属	属さないその他の単位の例
	3	名利	К		記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ		IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
ν	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				ĸ	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
ν				Д	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		$\boldsymbol{\nu}$		7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	r		ル	i.		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	ートル	系	カラッ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力	Ц		IJ	_	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J(「熱化学」カロリー)
ŝ	ク			\sim	μ	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$

この印刷物は再生紙を使用しています