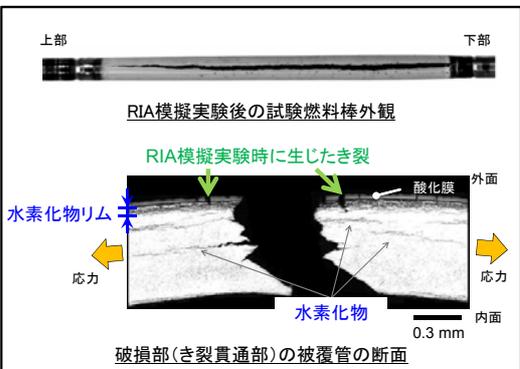


反応度事故時の燃料被覆管変形・破損挙動に関する研究

日本原子力研究開発機構 安全研究センター 燃料安全研究グループ

反応度事故(RIA)時のペレット・被覆管機械的相互作用(PCMI)による破損

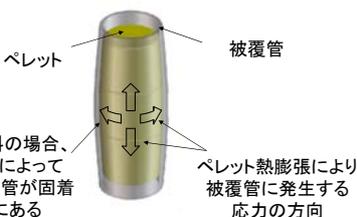
- ・高燃焼度燃料を対象としたRIA模擬実験時に軸方向き裂の発生を伴う破損例がみられたことから、その破損メカニズム及び破損限界を把握することは、発電用原子炉施設の安全確保において重要
- ・燃焼の進展に伴い、通常運転中の腐食に伴い発生した水素の一部が被覆管に吸収され水素化物として析出。水素化物は脆いため、被覆管が脆化 → RIA時の急速な温度上昇に伴うペレットの熱膨張によってPCMIが発生し、脆化した被覆管が破損



RIA模擬実験で破損した高燃焼度PWR燃料の例¹⁾

PCMI発生時に作用する応力

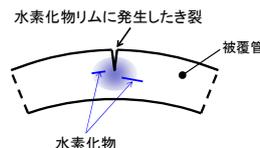
- ・PCMI発生時の被覆管変形はペレットの等方的な熱膨張に支配され、被覆管に二軸応力(軸及び周応力)が発生する状態になる



PCMIによって発生する応力の状態

水素化物の析出による被覆管脆化

- ・PCMI発生時には、最初に水素化物リムにき裂が発生。その後、被覆管内面側にき裂が進展し貫通に至る
- ・き裂先端から被覆管内表面にかけた領域の水素化物の存在形態がき裂進展挙動や破損限界に影響を及ぼす可能性

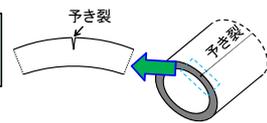


き裂進展開始時の被覆管断面模式図

RIA時のPCMI破損挙動解明のための被覆管機械特性試験

PCMI発生時に水素化物リムに発生するき裂を模擬するため、外表面予き裂入りZircaloy-4被覆管を作製

- ・冷間加工材(CW)、最終熱処理として応力除去焼鈍(SR)及び再結晶焼鈍(RX)を施した材料の3種類



外表面予き裂入りZircaloy-4被覆管

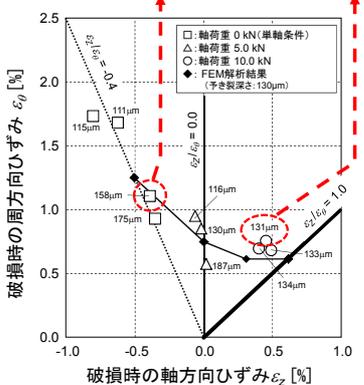
二軸応力影響評価試験²⁾

外表面予き裂入りZircaloy-4被覆管
き裂深さ(110 ~ 190 μm)

改良EDC試験
(周方向単軸及び二軸応力条件)
圧縮変位速度(0.1 mm/s)、室温
・軸方向及び周方向ひずみ測定

断面観察
光学顕微鏡観察
・破断形態観察
・き裂深さ測定

破損部の試験片断面金相観察結果例



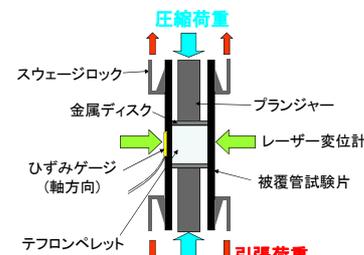
SR材料の破損時ひずみと応力二軸度の関係

応力の二軸度が著しくなるほど
破損時の周方向ひずみが低下する

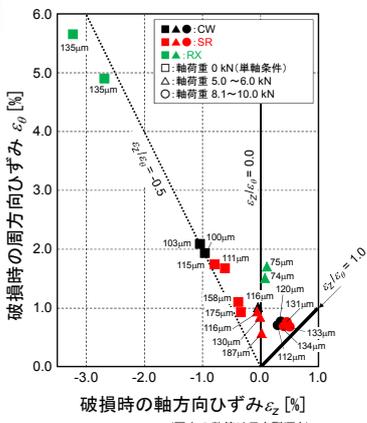
材料の拘束は、破損時ひずみを低下させるとともに、
破損時ひずみに及ぼす材料の機械特性の違いの影響を低減

改良EDC試験手法の開発²⁾

- ・テフロンペレットを被覆管試験片に挿入し、プランジャーにて圧縮することで、RIA時にPCMIにより被覆管に生じる応力条件を模擬
- ・従来のEDC試験では困難であった、二軸応力条件を系統的に変化させた試験が可能となるよう、軸方向荷重の負荷機構を付加



改良EDC試験装置の概要



異なる熱処理材料の破損時ひずみと
応力二軸度の関係

応力の二軸度が著しくなるほど
RX、SR、CWの差が小さくなる

水素化物存在形態の影響評価試験³⁾

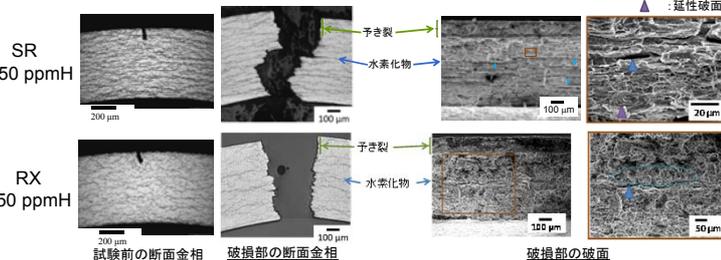
外表面予き裂入りZircaloy-4被覆管
き裂深さ(110 μm)

水素吸収処理
H₂中 400 °C
350, 500, 650 ppmH

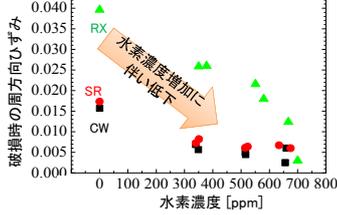
改良EDC試験
(周方向単軸応力条件)
圧縮変位速度(0.1 mm/s)、室温
・周方向ひずみ測定

断面観察
光学顕微鏡観察
・破断形態観察
・き裂深さ測定

破面観察
SEM観察
・破断形態観察



- ・SR材では周方向に、RX材では周方向に加え肉厚方向に水素化物の析出が観察される
- ・水素化物の析出に伴う脆性的な破面が観察される



破損時の周ひずみと水素濃度の関係

- ・予き裂先端から被覆管内表面にかけた領域での水素化物析出は破損限界を低下させる
- ・被覆管の最終熱処理条件が破損時の周方向ひずみに影響を及ぼす

被覆管に析出した水素化物の存在形態が破損限界に影響を及ぼす可能性

二軸応力及び水素化物析出状態がPCMI破損に及ぼす個別影響を評価し、破損モデルの高度化に有用な知見を提供

軽水炉燃料の事故時挙動に関する研究

日本原子力研究開発機構 安全研究センター 燃料安全研究グループ

■ 事故時の燃料挙動に関する研究

発電用原子炉施設が安全に設計されていることを確認するため、通常時に加え、様々な事故を想定した場合について安全評価が行われます。この評価において想定される事故は設計基準事故と呼ばれ、その代表例が、制御棒が急に抜けた際の出力暴走すなわち反応度事故（RIA）および配管の破断等により原子炉内の水が失われる冷却材喪失事故（LOCA）です。

発電用原子炉施設の安全確保は様々な機器類によって達成されますが、燃料には「放射性物質の閉じ込め」、「冷却可能形状の維持」及び「制御棒挿入性の維持」という安全上の役割が求められます。RIA や LOCA が起こった場合でも発電用原子炉施設の安全確保に必要な機能が維持されることを確認するためには、それらの事故時に燃料の安全機能が失われる条件を把握しておく必要があります。

そこで、燃料安全研究グループでは、日本原子力研究開発機構が所有する原子炉安全性研究炉（NSRR）や燃料試験施設（RFEF）といった施設を活用して RIA や LOCA の模擬実験を行い、設計基準事故における燃料挙動や破損メカニズムに関する理解を深めるとともに、発電用原子炉施設の安全評価に必要なデータの拡充及び燃料に関するより適切な安全評価手法の開発を行っています。また、設計基準事故を超えた条件における燃料挙動に関するデータの取得も進めており、重大事故対策の有効性評価に活用できる知見の取得に努めています。さらに、実験で得られた理解に基づいて通常時及び事故時の燃料挙動を適切に予測するための解析コードの開発を進めており、常に最新の知見を取り込むことでその予測精度の向上に努めています。

東京電力福島第一原子力発電所の事故を通して、従来の想定を超えた厳しい条件における燃料挙動を把握しておくことの重要性が明らかになりました。このため、研究対象とする想定範囲を拡げてデータ及び知見の取得を行っています。また、RIA および LOCA に関する従来の規制基準が妥当であること、及び安全評価において想定する条件に抜け等のないことについても再確認を行っています。

■ RIA 時の燃料被覆管変形・破損挙動に関する研究

RIA においては、原子炉の出力暴走によって生じる急速な燃料ペレットの温度上昇及びこれに伴う熱膨張の結果、被覆管が内側から急速に押し抜けられます。これはペレット・被覆管機械的相互作用(PCMI)と呼ばれ、発電用原子炉で長期間使用された燃料(高燃焼度燃料)において PCMI により破損する現象が NSRR を用いた RIA 模擬試験により確認されています。

軽水炉において燃料の燃焼が進むに従い、冷却材との接触により被覆管の外表面には腐食膜(酸化膜)が形成されます。この腐食膜の形成に伴い生成した水素の一部は被覆管(ジルコニウムが主成分)の金属部に吸収されますが、ジルコニウム中の水素の固溶限が低いことから水素化物となって析出します。ジルコニウム水素化物は機械的に脆く、被覆管の強度低下を招く可能性があります。加えて、特に加圧水型発電用原子炉(PWR)にて高い燃焼度まで使用された燃料では、被覆管の外表面酸化膜の内側に水素化物が高密度に析出した層(水素化物リム)の形成がみられ、RIA 模擬試験後の高燃焼度 PWR 燃料棒ではこの層に多数のき裂が発生した様子が観察されています。このことから、高燃焼度 PWR 燃料に関しては RIA の初期に水素化物リム内に発生したき裂の一つが被覆管肉厚方向に進展し、貫通に至るものと考えられています。また、高燃焼度燃料棒の内部では被覆管と燃料ペレットとの固着(ボンディング)がみられます。ボンディングを生じている場合、RIA 時に発生するペレットの変形が被覆管に直接伝わることになり、被覆管には周方向に加えて軸方向の応力が同時に発生します(二軸応力状態)。したがって、高燃焼度燃料の RIA 時の破損限界を評価する上で、二軸応力状態や水素化物存在形態が被覆管の変形及び破損挙動に与える影響を把握しておくことが必要ですが、そのようなデータ及び知見は極めて限られています。

RIA 時の燃料被覆管変形・破損挙動に及ぼす被覆管の二軸応力及び水素化物存在形態の影響を調べるため、燃料安全研究グループでは新たな装置及び手法を開発しました。被覆管に発生する二軸応力状態を模擬するため、Expansion Due to Compression (EDC) 試験(基本的な試験手法は Studsvik Nuclear AB が開発)を改良することで、被覆管に軸方向及び周方向に同時に応力を発生させることが可能な試験装置を開発しました。この改良 EDC 試験装置により、PCMI によって被覆管に発生する様々な応力条件における破損限界を評価することが可能になりました。また、水素化物リムに発生したき裂を模擬するため、被覆管製造時の加工法を工夫することによって被覆管の外表面に予き裂を形成させる手法を考案しました。この手法で製作した被覆管に水素を吸収させることで、き裂進展に及ぼす水素化物存在形態の影響を評価することが可能になりました。

外表面予き裂入り被覆管及びこれに水素を吸収させた被覆管を対象に改良 EDC 試験装置を用いた試験を実施し、二軸応力状態及び水素化物存在形態が被覆管の破損に及ぼす影響を調べた結果、応力の二軸度が著しいほど破損時の周方向ひずみが低下すること、材料の最終熱処理条件に起因する機械特性の違いが破損時のひずみに及ぼす影響は材料の拘束により低減されること、及び予き裂先端から被覆管内表面にかけた領域での水素化物存在形態が破損時の周方向ひずみに影響することが明らかとなりました。

本研究により、PCMI 破損に及ぼす二軸応力状態及び水素化物存在形態の影響について知見を得ることができました。今後は開発した試験技術を活用してデータを拡充すると共に、得られた知見に基づいて破損現象のモデル検討を進め、破損限界評価手法の高精度化及び信頼性向上を図ります。