

1.2.5.3 共通技術 金属水素化物の開発(1/4)

○ 研究の背景 / 目的

高速増殖炉サイクル実用化戦略調査研究におけるナトリウム冷却炉の炉心設計研究では金属水素化物の減速材利用が検討されている。特に、水素化ジルコニウムを使用する径遮蔽体は枢要技術となっている。また、減速材要素を混載するLLFP核変換集合体についても高速炉体系への導入可能性に対する基盤研究開発が進められてきた。本件は、径遮蔽体用と核変換集合体用の減速材要素の実用化のための要素技術開発を目的として実施したものである。

設計研究からの期待条件をもとに減速材要素の基本仕様を選定した結果を表1に示す。減速材要素の寿命制限因子としては使用期間中の水素の拡散透過による冷却系への移行と構成材料の照射安定性がある。そこで、金属水素化物（減速材）と被覆管との組み合わせとして、被覆管には両者ともに水素バリアー機能付フェライト系鋼被覆管が必要であり、径遮蔽体用には水素化ジルコニウム、核変換集合体用には水素化イットリウムを採用することにした。

表1 設計研究からの期待条件とそれに基づく減速材要素の基本仕様選定結果(*:設計研究例によって異なる)

	径遮蔽体	核変換集合体*
使用期間(目標)	60年(原子炉寿命と同じ)	約9年
高速中性子照射量(E>0.1MeV)	~50×10 ²² n/cm ²	~50×10 ²² n/cm ²
被覆管最高温度	600℃程度まで	700℃程度まで
集合体構造例(減速材要素配置)	太径ピンバンドル・ブロック積層	細径ピンバンドル
減速材候補物質	水素化ジルコニウム	水素化イットリウム(水素化ジルコニウム)
被覆管候補材料	水素バリアー付PNC-FMS被覆管	水素バリアー付ODSフェライト鋼

○ 実施内容

1. 水素化ジルコニウムと水素化イットリウムの試料製造と設計評価用物性値集整備

水素化ジルコニウムと水素化イットリウムの実験室規模の試料製造試験を行い、試料製造性の調査を行った。製造した試料をもとに物性測定を行い、設計評価用物性値集として整備した。

2. 被覆管候補材料に対する水素バリアー材の開発

拡散透過による冷却系への水素の移行を抑制するため、被覆管内面への水素バリアー材の加工技術開発を行った。

3. 「常陽」照射試験準備

減速材要素の照射性能を実証するため、「常陽」照射試験準備を行った。

1.2.5.3 共通技術 金属水素化物の開発 (2/4)

○ フェーズⅡ期間中の研究成果(1)

1-1水素化ジルコニウムと水素化イットリウムの試料製造

・水素化ジルコニウムと水素化イットリウムの化学組成について、相安定性と平衡解離圧力の観点からそれぞれH/Zr比=1.65±0.02とH/Y比=1.80±0.03を選定した。

・実験室規模において試料製造を行ったところ、クラックフリー試料を意図する化学組成仕様範囲に対して再現性よく製造できた。

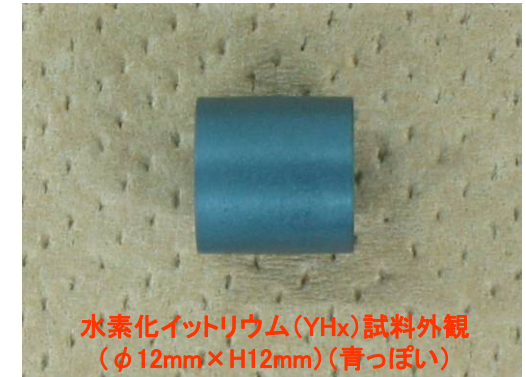
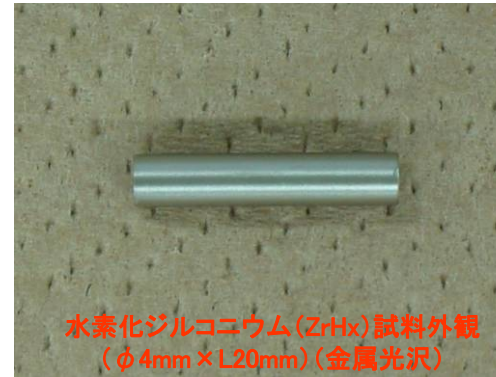


図1 水素化ジルコニウム試料と水素化イットリウム試料の製造例

1-2水素化ジルコニウムと水素化イットリウムの設計評価用物性値集

・水素化ジルコニウムと水素化イットリウムの化学組成について、基本物性、熱物性、機械物性等を測定し、相関式あるいは推奨値を策定した。

・ナトリウム浸漬試験を行った結果、共存性に問題ないことを確認した。

・拡散対を作製して被覆管共存性試験を行った結果、水素化ジルコニウムについては問題はなかった。水素化イットリウムの場合は600℃を越えると共晶反応が生じるため、防止対策が必要なことがわかった。

表2 物性試験項目

基本物性	密度、格子定数、金属組織、熱膨張係数
熱物性	比熱、熱伝導度
機械物性	ヤング率・剛性率・ポアソン比
解離特性	平衡解離圧力(文献調査のみ)
環境効果	ナトリウム共存性、被覆管材料共存性
照射効果	文献調査のみ

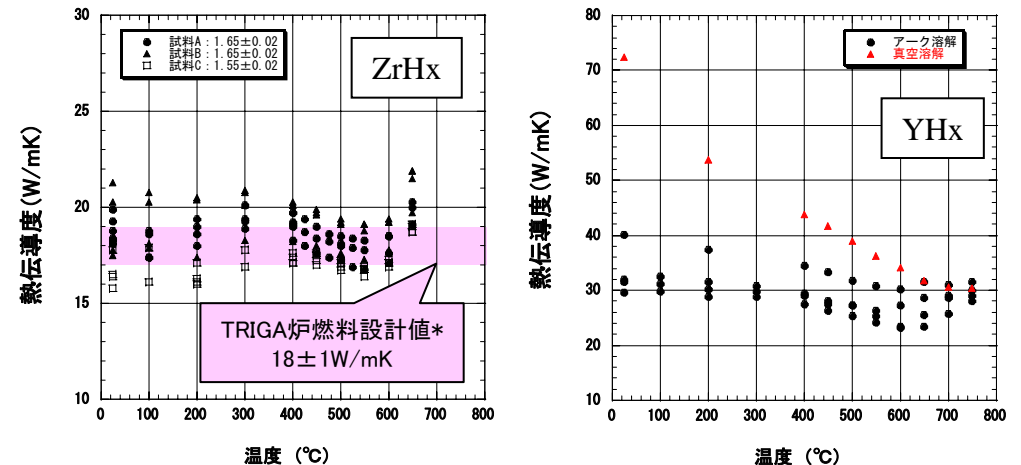


図2 水素化ジルコニウム試料と水素化イットリウム試料の熱伝導度測定結果

1.2.5.3 共通技術 金属水素化物の開発 (3/4)

○ フェーズⅡ期間中の研究成果(2)

2-1PNC-FMSとPNC316の水素透過係数測定

・被覆管からの水素透過速度を高精度で測定可能な試験技術確立した。四重極型質量分析計に接続した真空チャンバー内で水素ガス内圧を印加した状態で加熱し、拡散透過によって表面から放出されたH₂を電流値として計数し、透過速度に換算する。

・基準となるPNC-FMSとPNC316の水素透過係数を独自に測定した。過去の報告例との整合性は良好であった。得られた関係式は減速材要素の設計に限らず、水素の拡散透過現象の解析に広く適用可能である。

$$\Phi_{PNC316} = 2.294 \times 10^{-7} \exp\left(-\frac{63,165}{RT}\right) \quad \Phi_{PNC-FMS} = 5.857 \times 10^{-8} \exp\left(-\frac{42,924}{RT}\right)$$

Φ : 水素透過係数 mol-H₂ gas m⁻¹ s⁻¹ Pa^{-0.5}, R: ガス定数 (8.31451 J mol⁻¹ K⁻¹), T: 温度 K
不確かさ(相対値): 統計誤差1σ相当値→PNC316:6%、PNC-FMS:8%

2-2水素バリアー材の開発

・核融合炉液体ブランケット、水素製造等の類似例を参考に候補技術を抽出し、既存の被覆管製管プロセスとの整合性とナトリウム冷却炉環境への適用性の観点から評価した。そして、候補技術として被覆管内面へのカロライズ処理と耐熱鋼積層処理の2種類を選定した。

・カロライズ処理を優先し、既製の短尺PNC-FMS被覆管（直径14~15mm、長さ50mm程度まで）あるいは板材を母材に試験片を製作して水素透過速度の測定を行った。

・カロライズ処理だけでは水素バリアー効果は発現せず、低酸素ポテンシャル雰囲気における加熱処理（酸化皮膜生成）の追加が必須であることがわかった。酸化処理プロセスを施すことにより、図3のように最大では水素透過速度を約100分の1程度まで低減できた。

・PNC-FMSの既存の被覆管製管プロセスとの整合性を図るため、焼き戻し処理（780°C×1hr）が炉冷処理であることに着目し、冷却過程に酸化処理プロセスを付加することにした。結果として、約20分の1程度までの水素バリアー効果を得ることに成功した。

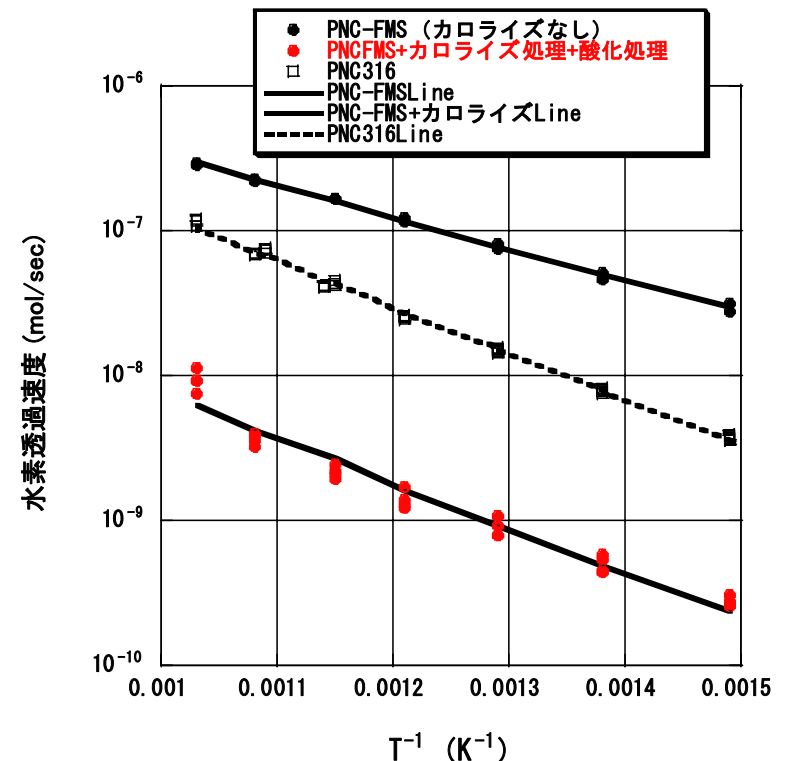


図3 水素バリアー効果の最高到達条件

1.2.5.3 共通技術 金属水素化物の開発(4/4)

○ 「常陽」照射試験準備

1. 計画検討

径遮蔽体と核変換集合体ともに中性子照射量に対する期待条件が炉心燃料と同等であるが、使用期間が長いのが特徴である。また、「常陽」では金属水素化物に関する照射実績がないことから、中間検査と継続照射を活用し、中性子照射量に対する期待条件の1/3程度までの健全性を早期に達成して実用化の見通しを得る方針とした。特に、ナトリウム冷却炉における枢要技術である径遮蔽体用については、さらなる中性子照射量と使用時間に対する健全性は実機サーベイランス等によって確認する方針とした。

○ 今後の課題

1. 径遮蔽体用減速材要素に関する実用技術開発

水素化ジルコニウムの太径ペレット製造技術の開発(工学規模生産)、水素バリヤー付長尺PNC-FMS被覆管の製管(長さ1000mm以上)等の実機条件に対する実用技術開発が必要である(2006年度以降)。また、水素バリヤー効果をさらに高めるための要素技術開発を継続して行う必要がある(2006年度以降)。

2. 核変換集合体用減速材要素に関する実用技術開発

水素バリヤー機能とイットリウムとの共晶反応抑制機能を合わせ持った長尺ODSフェライト鋼被覆管の製管技術の開発を進める必要がある(2006年度以降)。また、効果的なLLFP核変換のための減速材利用についても検討を継続することが望まれる(2006年度以降)。

3. 照射試験

水素化ジルコニウムと水素化イットリウムを使用した減速材要素の高速炉環境における照射特性に関する知見は非常に少ない。「常陽」照射試験によって照射安定性を確認していく必要がある。

○ 公開資料

1. 井上賢紀、芹川修道、高橋英紀、鵜飼重治、「高速炉炉心構成要素用オーステナイト系およびフェライト系ステンレス鋼の水素透過特性評価-SUS316相当鋼と高強度フェライト/マルテンサイト鋼の水素透過係数測定-」：JNC TN9400 2002-056 (2002)。

2. Masaki INOUE, Shigeharu Ukai, "Research and development of neutron moderators with metal hydrides for sodium cooled fast breeder reactors", in Proceedings of International Conference Global2005, Tsukuba, Ibaraki, Japan, October 9-13, 2005, CD-ROM Paper No. 591 (2005)。