

科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会原子力科学技術委員会
核融合研究作業部会(第32回)
平成24年7月31日(火)
文部科学省17階研究振興局会議室

核融合炉材料開発

大学, NIFSにおける先進材料の高度化研究
先進材料を含む開発ロードマップ
IFMIFの必要性と役割

室賀健夫

核融合科学研究所

大学の核融合炉材料研究に関する議論

中期的展望に立った核融合炉 第一壁構造材料の開発の進め方について
(平成12年5月17日 核融合会議計画推進小委員会)

7. 1. 研究開発推進体制 (抜粋)

日本原子力研究所(当時)

- (イ) 第一候補材料についての研究開発を進める中核的役割を果たす。
- (ロ) 国内の関係機関との密接な連携・協力。
- (ハ) IFMIF計画の推進。

大学等

- (イ) 大学等有する広範な知見を活かしつつ、先進候補材料に関する基礎的若しくは先導的研究を積極的に進める。
- (ロ) 大学の材料試験炉利用施設を整備。
- (ハ) 炉工学研究ネットワークの構築を推進。

第一候補材料 -- 低放射化フェライト鋼:
先進材料 -- バナジウム合金、SiC/SiC複合材料:

第一候補材（低放射化フェライト鋼）と先進材料

低放射化構造材の候補材

第一候補材

低放射化フェライト鋼 : F82H など

バナジウム合金 : V-4Cr-4Ti とその改良

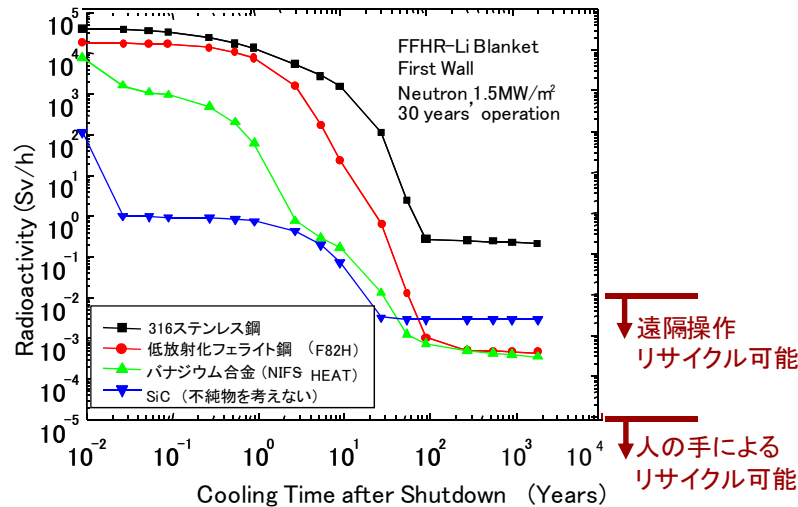
先進材料

SiC 複合材

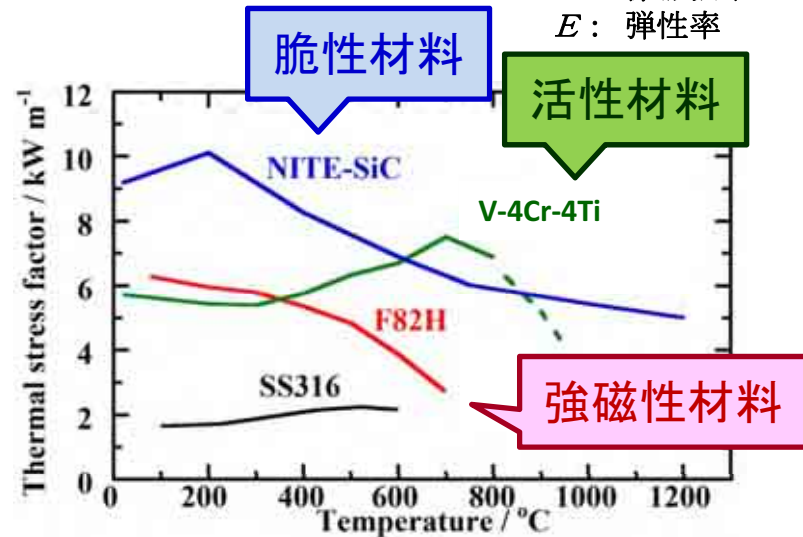
(その他、酸化物分散強化鋼 (ODS鋼) など)

$$M = \frac{\lambda \sigma_{UTS} (1 - \nu)}{\alpha E}$$

M : 熱応力因子
 λ : 熱伝導率
 σ : 引張り強度
 ν : ポアソン比
 α : 線膨張率
 E : 弾性率



低放射化特性



耐熱・高熱負荷特性

(熱クリープは考慮していない)

先進材料は、開発段階は遅れているが、より高温使用を可能とする
 それぞれの候補材は本質的な重要課題を有している

大学の核融合炉材料研究への取り組み

広範な知見を生かした、低放射化フェライト鋼研究への取り組み

大学の鉄鋼研究インフラを生かした候補材の研究

9Cr, High Ta 鋼 (JLF-1) の製作、評価、F82Hとの比較

先進的接合法、被覆研究、液体ブランケットに関わる腐食研究など

→ BA 協力研究を基盤とした発展

バナジウム合金に関する基礎・先導的な研究 (参考資料)

高純度大量製造につながる溶解法、高純度部材製作加工技術の確立

高温強度の一層の高度化に向けた研究

照射基礎特性、被覆、接合、耐食性 などブランケット基盤データベース整備

SiC/SiC複合材に関する基礎・先導的な研究 (参考資料)

構造材料用高密度・高伝導材、耐熱板用ポーラス材製造法の確立

接合技術、部材製作加工技術の高度化

照射基礎特性、接合、耐食性 などブランケット基盤データベース整備

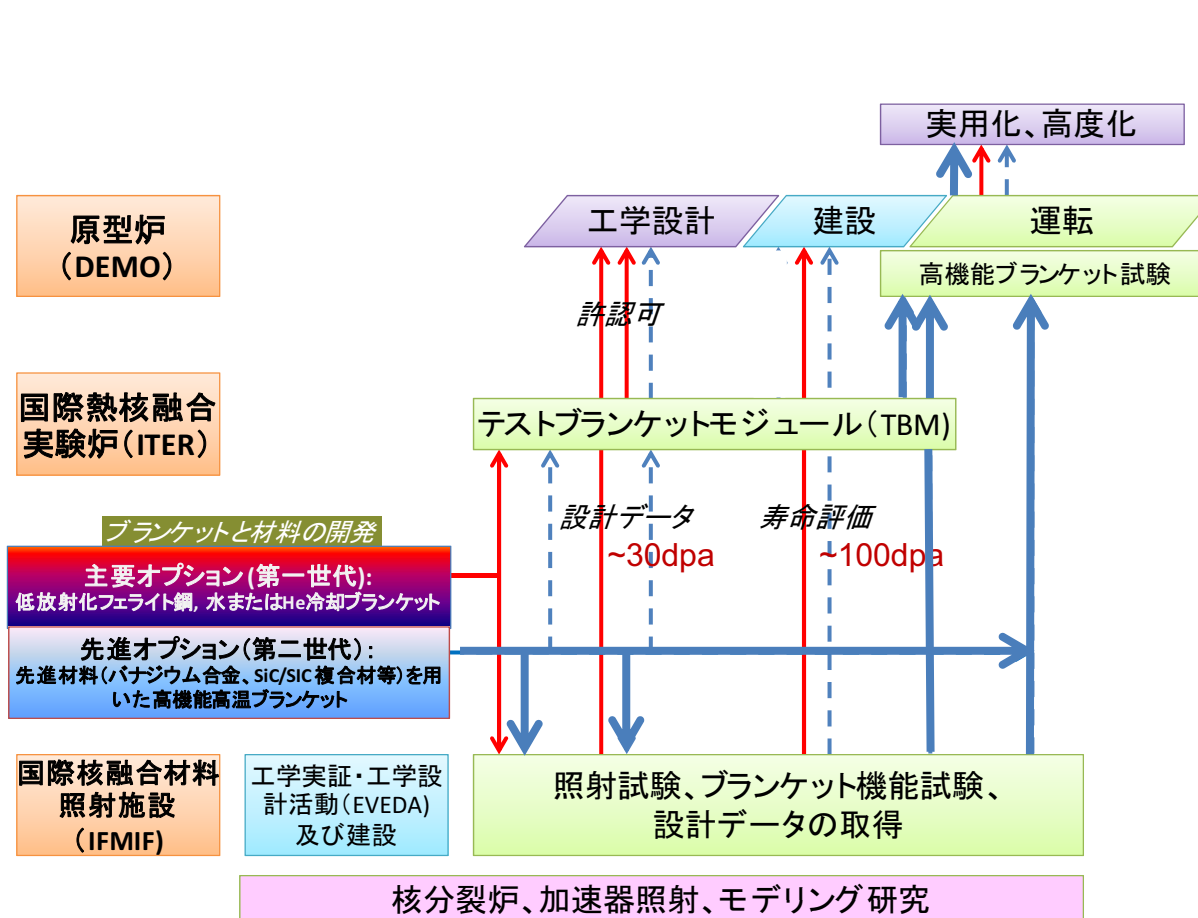
広範な基礎的研究

照射効果、微小試験件技術、接合・被覆技術、両立性など

炉設計、ブランケット設計への貢献

NIFS工学プロジェクト、BA原型炉設計共同研究などによる貢献

材料開発ロードマップ (IFMIFの先進材料開発への役割)



低放射化フェライト鋼

照射試験をIFMIF初期に行い、中線量照射データ(~30dpa)を原型炉設計に間に合わせる。(確証試験)

引き続き低放射化フェライト鋼の重照射試験(~100dpa)を行い、原型炉の運転寿命についての指針を得る (建設期)

先進材料

高度化戦略

IFMIF初期には小規模の試験を行い、基本特性の確認(モデル検証)を行う。

IFMIF後期で先進材料の中~重照射試験を行い、高度化工学設計に必要なデータを得る

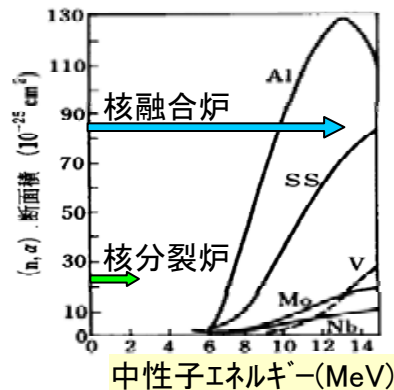
DEMOにおいては先進材料を用いた高機能ブランケットの試験を行う

日欧の材料開発ロードマップ
IFMIF Users Specification and Proposals
(IFMIF SWG March 2010) を翻訳加筆

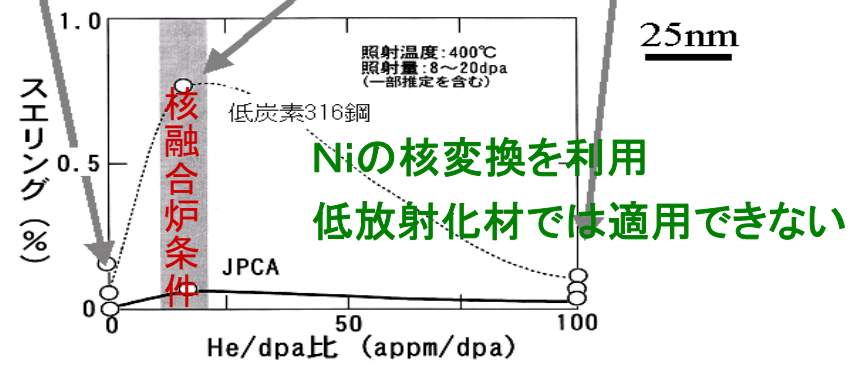
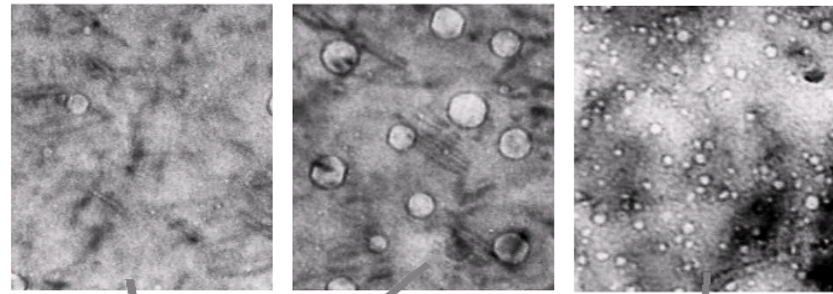
IFMIFがなぜ必要か

ITER、プラズマ中性子源では、中性子照射量が低すぎ、寿命を含めた材料の特性評価が不可能

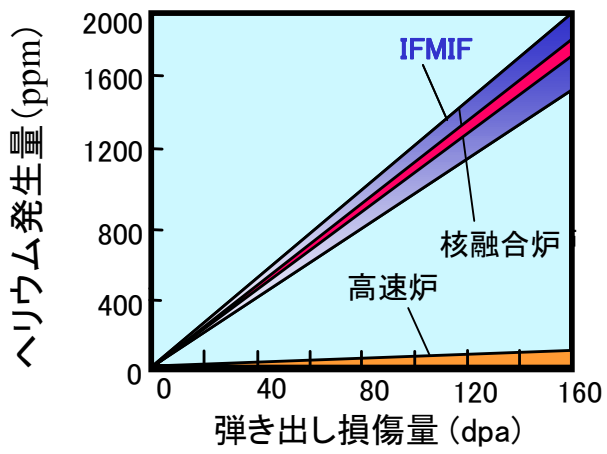
核分裂中性子では、スペクトルの違いにより核変換ヘリウム効果の確認ができない



ヘリウム発生
核変換の反応
断面積



ヘリウム発生
速度の比較

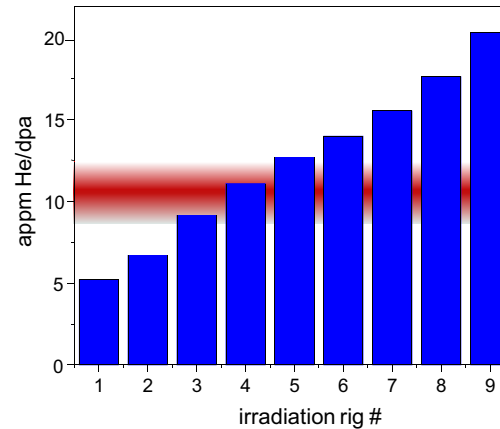
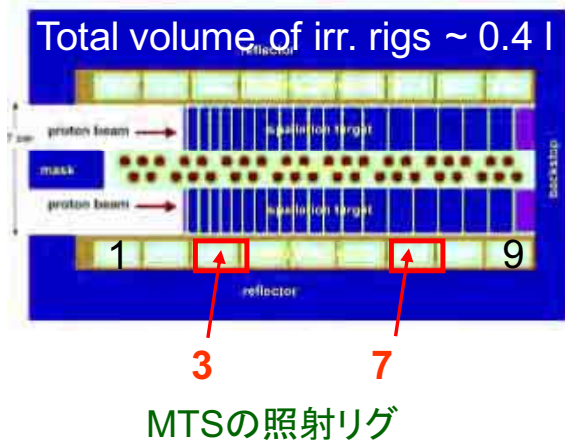


オーステナイト鋼 (Fe-Ni-Cr合金) におけるヘリウム効果 (Rowcliffeほか)

ホウ素添加など、原子炉照射中にヘリウムを発生させる方法が試みられたが、核融合環境での信頼できるヘリウム効果の理解は得られていない。(参考資料)

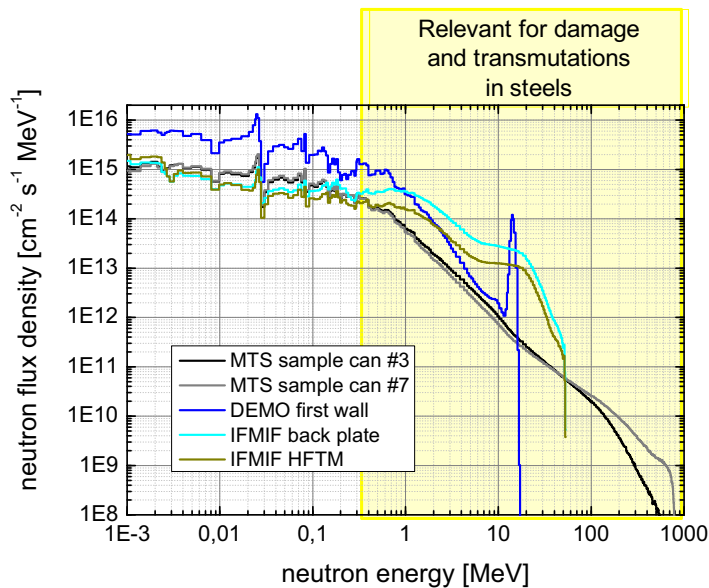
核破砕中性子源の利用可能性

SNS (ORNL), MTS (LANL), SINQ (PSI), J-PARC --



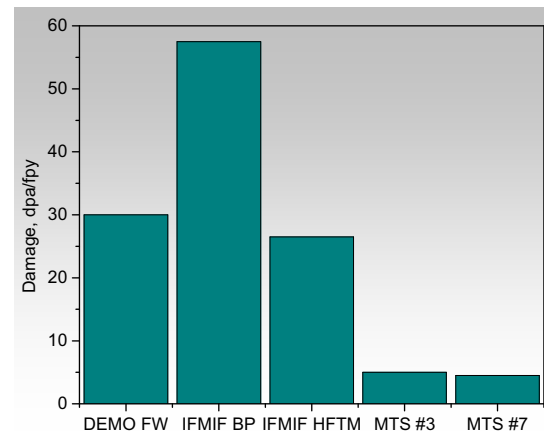
核融合相当のHe/dpaは一部でしか再現されない (IFMIFでは、ほぼ強照射領域全域で再現可能)

MTS各照射リグにおける He/dpa



MTS/DEMO/IFMIFの中性子スペクトル

Moeslang (ICFRM-15) 発表図面より



DEMO, IFMIF, MTS の年間照射量

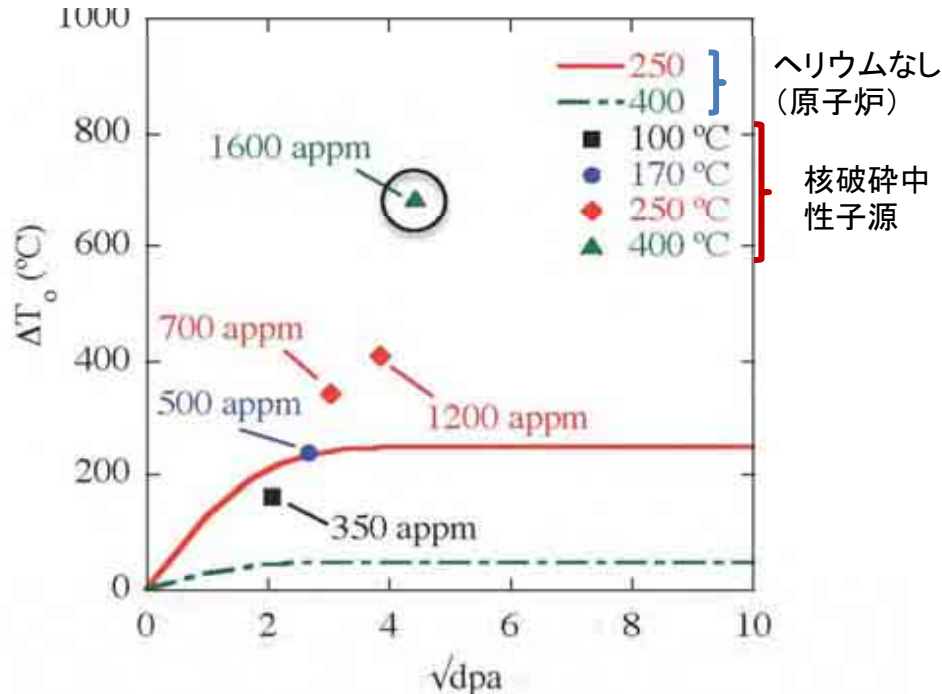
照射量は、DEMO/IFMIF よりかなり低い

Pre-IFMIFとして、低線量、幅広いHe/dpaにおける試験としては利用できる

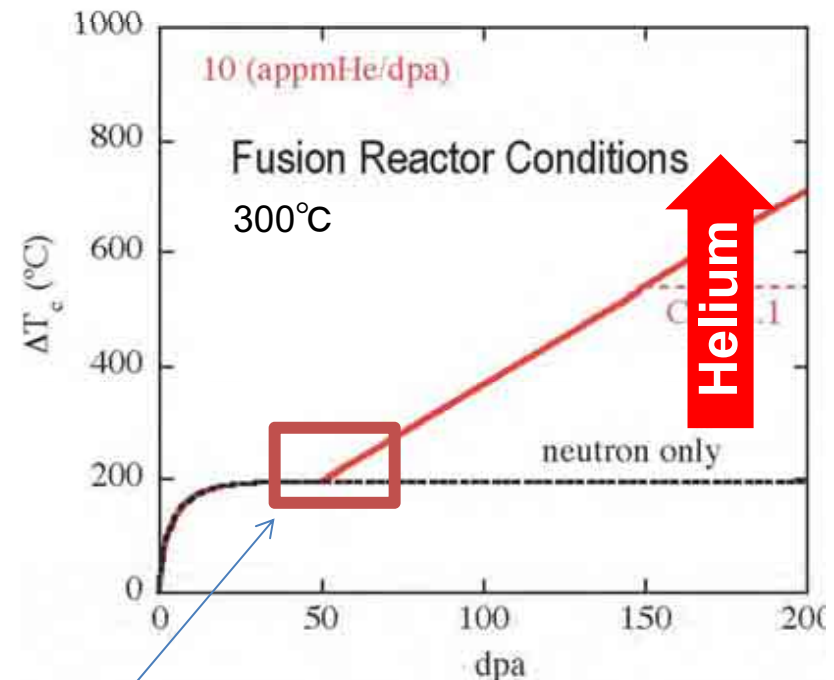
核破碎中性子源によるヘリウム効果の研究

延性脆性遷移温度(DBTT)の変化(ΔT)に及ぼす照射とヘリウムの効果 (低放射化フェライト鋼)

Kurtz (SOFT-26) 発表図面より



照射試験の結果



特に検証が必要な領域

モデル等による核融合条件での予測

核破碎中性子源による試験は、温度、照射量、ヘリウム発生量の制御が難しい。限られたデータと原子炉照射、モデリング等により、IFMIFで検証すべき条件が絞られてくる。

プラズマ中性子発生装置による材料試験

米国のFNSF提案のように、プラズマ中性子源による材料照射試験が検討されている

IFMIFでは難しい**コンポーネント統合試験**ができることの意義は明らか

但し、**プラズマ中性子発生装置がこの目的のために最適化されている必要がある**

材料開発をこの装置で行えるという主張があるがこれは疑問

プラズマ中性子発生装置の構造材の健全性、許認可をどうやって受けるか

(このためにIFMIFが必要になる)

“10 dpa程度までの健全性は、現在のデータで担保できる。プラズマ中性子発生装置の前面に試験体を置き加速試験と行う”という案が提示されている—bootstrap approach

軽水炉圧力容器鋼監視試験に類似した手法

軽水炉の水減速材の中で10cm程度内側に置き、

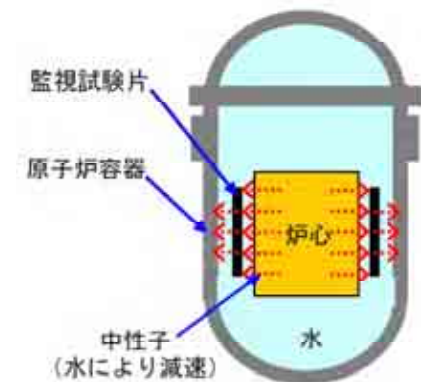
2-3倍のフラックスを得ることが可能

(温度、スペクトルほとんど同じ)

圧力容器鋼材料は、材料試験炉で高い照射量までの

試験データが既に取られている。

プラズマ中性子源への適用は難しいと考えられる



軽水炉圧力容器鋼の監視試験

材料開発のための照射試験装置のまとめ

	候補材、試験条件の絞り込み、定性データ	材料の挙動評価 (モデル検証)	材料の寿命評価	コンポーネントテスト
原子炉	◎ 海外炉も含めて積極的に利用すべき	△ 核変換の評価が難しい	△ 核変換の評価が難しい	△ 照射効果のみ 体積限られる
核破碎中性子源	○ He効果の定性的な評価に適用可能	△ He発生制御、照射量の点から限定的になる	× 照射量の点から不可能	△ 照射効果のみ 体積限られる
プラズマ中性子源	× 運用時期、性能上不可能	△ 制御性、照射量の点から難しい	× 照射量の点から不可能	◎ 試験のための最適化が必要
IFMIF	△ 運転初期にある程度可能(微小試験、低照射量)	◎ 制御された核融合環境での挙動評価が可能	◎ 制御された核融合環境で寿命までの照射が可能	△ 照射効果中心に中低フラックス領域で可能



相補的な活用が可能

ブランケット機能試験の観点は含めない

IFMIF の仕様について

最低限変更できない仕様

中性子スペクトル (He/dpa, 他の核変換生成物発生量)
温度、雰囲気等の制御性

設計との間で調整が可能な仕様

照射量、照射体積

照射試験 マージン の見直し

微小試験片技術の高度化と材料試験規格の進展に合わせた、想定マトリックスの見直し

DEMO工学設計に必要な照射データベースの見直し

(例: ~30 dpa → ~20 dpa)

IFMIF仕様のオプション確定ため、今後必要なこと(EVEDA期間内に)

DEMO工学設計に向けた微小試験片試験規格整備方針の確定

これに基づき、IFMIFのテストマトリックス、試験計画の具体化を行う

仕様のオプションが明確になる

規格、基準、安全について

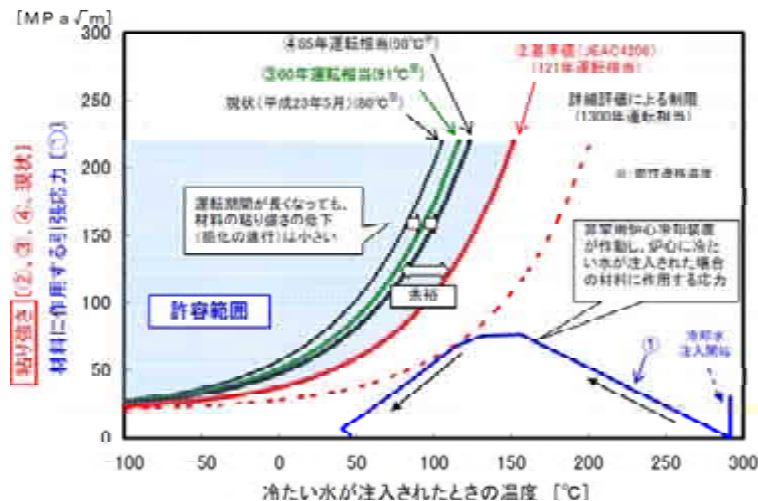
安全の観点から、放射化、崩壊熱、トリチウムインベントリー、反応性、毒性、等の特性を材料の規格基準にどう取り入れていくか。

ブランケットの安全上の位置づけは？

1. 安全障壁（原子炉圧力容器に相当）
2. 軽微な破損を容認する（被覆管に相当）
3. 安全障壁ではないが、破損は容認されない（資産保全上は1.と同じ）

上記の位置づけによって影響を受ける課題の例

脆性材料をブランケット構造部材に使用できるか。（SiC/SiC複合材開発の目標）
DBTTの上昇はどこまで許されるか、そのシナリオ、説明は



事故時に冷水が注入されても健全性が確保されることを説明

原子炉圧力容器の健全性の説明の例
（電力会社のホームページより）

1. の場合このような評価が必要
3. ではどのような評価が必要か

まとめ

大学では、JAEAとの責任分担の下、**広範な基礎研究**に加え、**先進材料の高度化**を**目指した研究開発**を進め、高品質の候補材製作技術の確立とデータベース構築を進めている。

IFMIFは、**DEMO工学設計用材料データベース**を得るために**必ず必要**である。**先進材料**による高機能ブランケット開発においても、**IFMIFは重要な役割**を果たす。

原子炉、核破砕中性子源は、**IFMIFの試験領域を絞り込むために有用**であるが、IFMIFに取って代わることはできない。

プラズマ中性子源は**コンポーネント試験**として意義があるが、材料開発、DEMO用材料工学データ取得のためには不十分である。プラズマ中性子源をコンポーネント試験として用いるためには、そのための**装置、運転の最適化が必要**である。

EVEDA期間内に、DEMO工学設計に向けた**材料試験の規格基準整備方針**を確定し、**IFMIFテストマトリックス、試験計画の具体化**を行う必要がある。これらにより、IFMIF仕様のオプションも明らかになる。

参考資料

大学における先進材料の開発
(バナジウム合金、SiC/SiC複合材料)

原子炉を用いたヘリウム効果の評価の試み

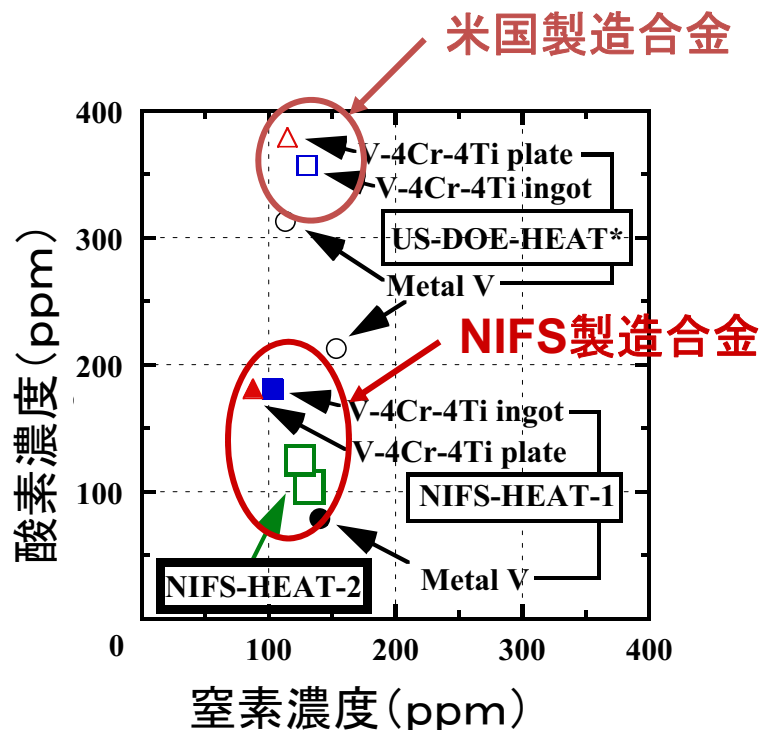
NIFS, 大学によるV-4Cr-4Ti 合金製造技術開発



大量製造につながる方法で、酸素不純物濃度100-150ppmの部材製作技術を実証

溶接は6 mm厚までを実証

バナジウム合金の高純度化による製作性の向上



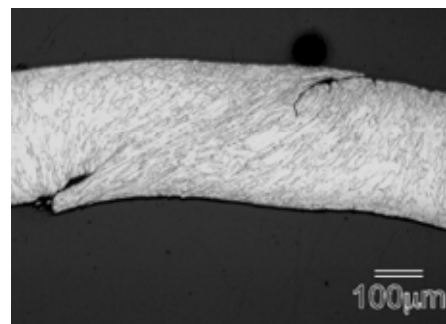
製造合金の酸素、窒素濃度

高温強度の一層の向上を目指した改良

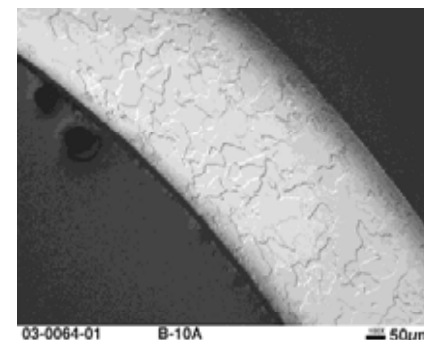
高Cr化、加工熱処理改善、ナノ粒子分散

ブランケット設計基盤データベース整備

照射効果、耐食性、異材接合、被覆開発

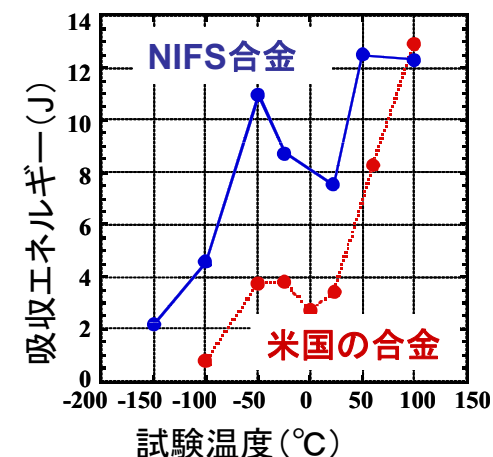


米国製造合金



NIFS製造合金

高純度化により管材の製作精度が向上

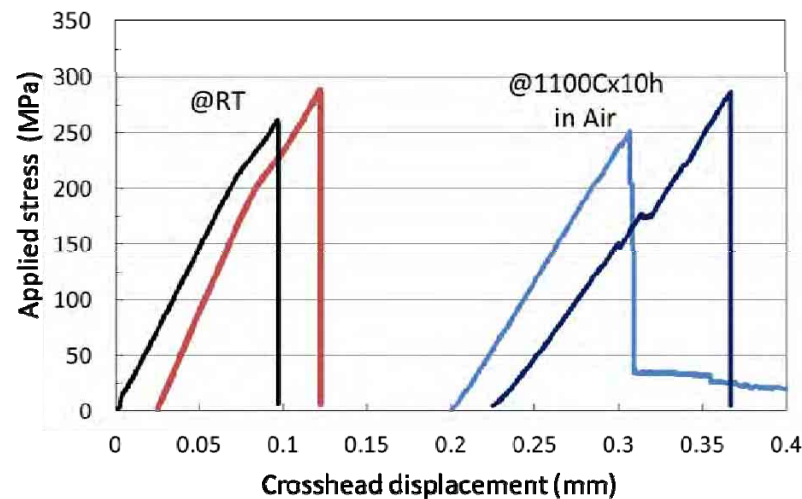
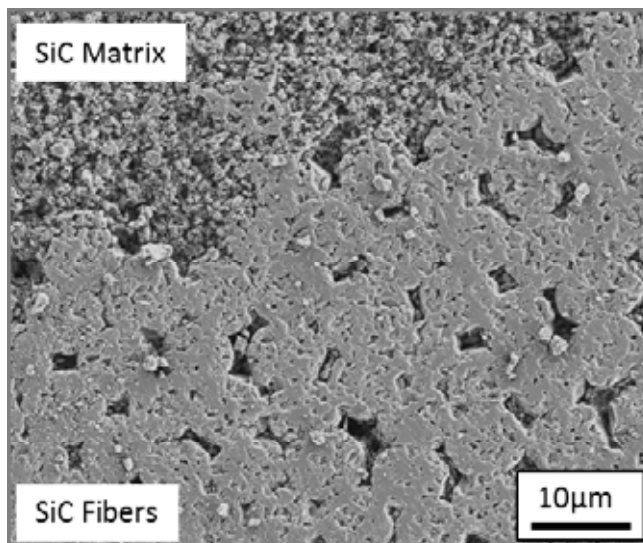
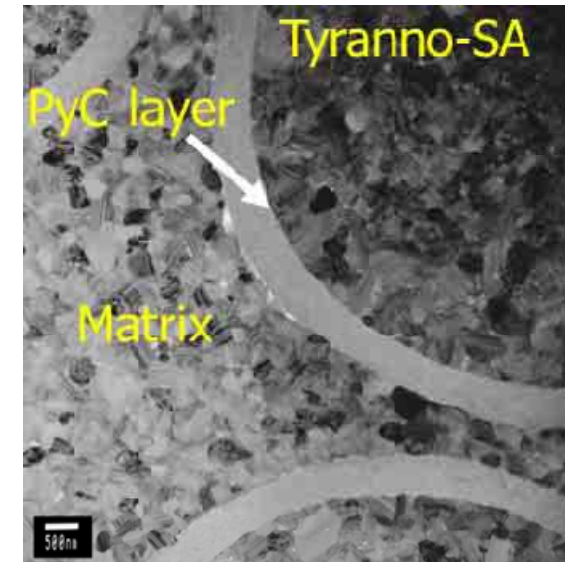
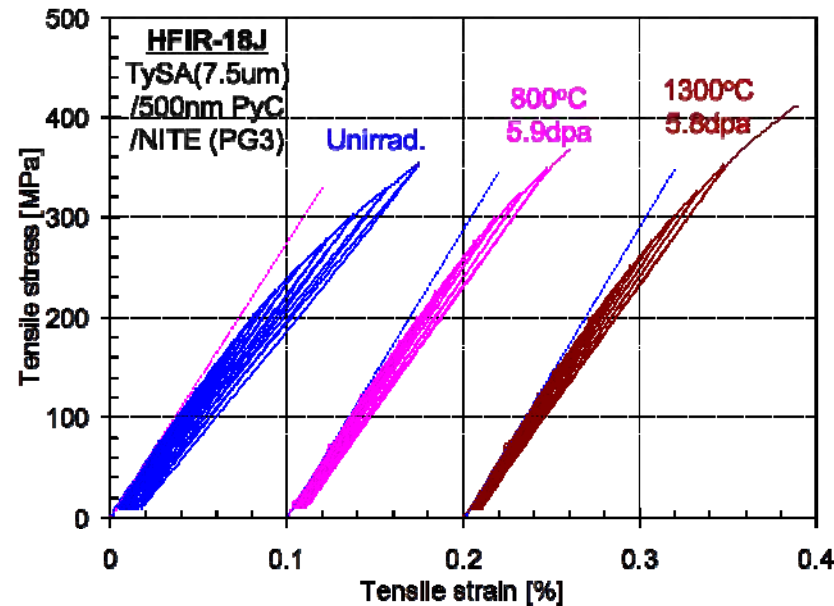


高純度化により接合部の靱性が大幅に向上

大学におけるSiC/SiC 複合材料開発

NITE-SiC/SiC

- ・高強度
- ・高熱伝導度
- ・耐中性子照射特性
- ・ITER BA標準材
(JAEAでデータベース構築)



Porous-SiC/SiC

- ・耐高温酸化特性
- ・低電気伝導
- ・低熱伝導
- ・液体ブランケット
の耐熱板へ適用
- ・低コスト

SiC/SiC 複合材料の接合技術開発



SiCと金属の接合

- ・W接合(熱膨張係数が近く比較的容易)
- ・鉄鋼材料接合(Wと熱膨張係数を緩和する材料を界面として接合)

SiC/SiC複合材料同士の接合

- ・母材に近い接合強度
- ・複雑形状に対応した接合技術開発
- ・耐中性子照射特性

- ・ DEMO設計のための基盤データベースの整備が当面の目標

⇒BA活動において中心的に実施

資料提供: 檜木達也(京大)

原子炉を用いたヘリウム効果の評価の試み

ホウ素添加法

天然ホウ素 (^{10}B 20%, ^{11}B 80%) のうち
 $^{10}\text{B} + n$ (thermal) \rightarrow $^4\text{He} + ^7\text{Li}$
により核分裂炉で He 発生

^{10}B 添加によりヘリウムがボイドスエリング、
脆化を促進する

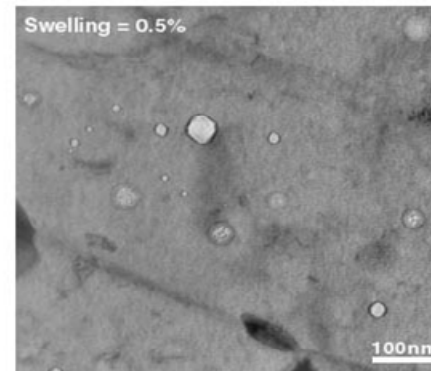
ホウ素の添加により材料の性質が変わってしまったという解釈

^{10}B と ^{11}B の比率を変えた実験により、 ^{10}B の
核変換が脆化を促進することを実証

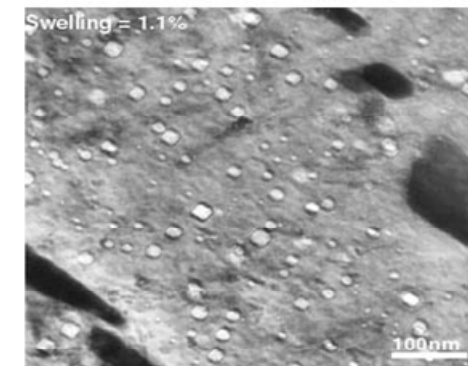
しかし、核変換 He ではなく、核変換 Li の効果とい
う解釈もありうる - He 効果を正確に評価できない

このほか、トリチウムのHe(3)への壊変を利用した研究
ニッケルの同位体の熱中性子との反応によるヘリウ
ム発生を利用した研究、なども行われたが、適用範囲
が極めて限られている。

IFMIFによる検証が必要

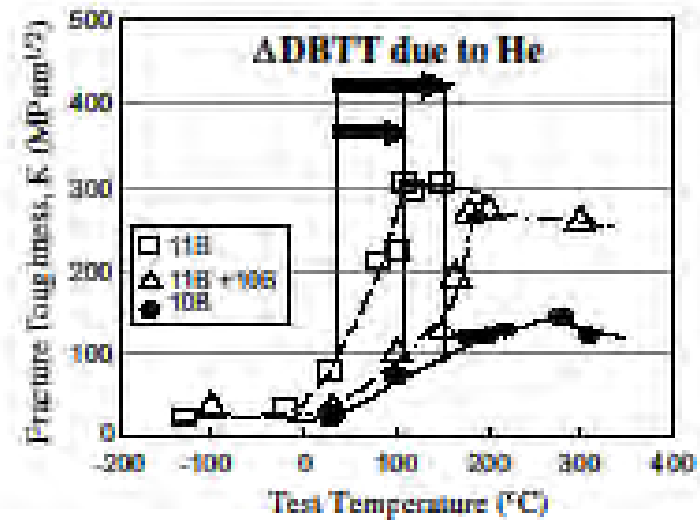


F82H (36 appmHe)



^{10}B -doped F82H (330 appmHe)

^{10}B 添加によるボイドの増加
(HFIR 400°C、51dpa)



同位体調整ホウ素添加による
DBTTの変化 (JMTR 200°C)

(若井)