

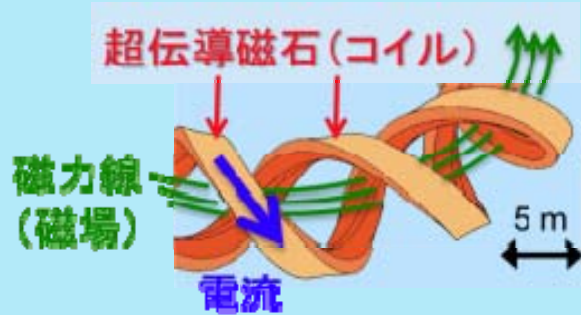


核融合原型炉に向けた電磁石・発電システムの工学研究の推進

5つの大規模実験研究による工学基盤構築の加速
(ランドマーク)

(1) 大型高磁場超伝導マグネット研究

◇安定で長寿命な超伝導電磁石の提案



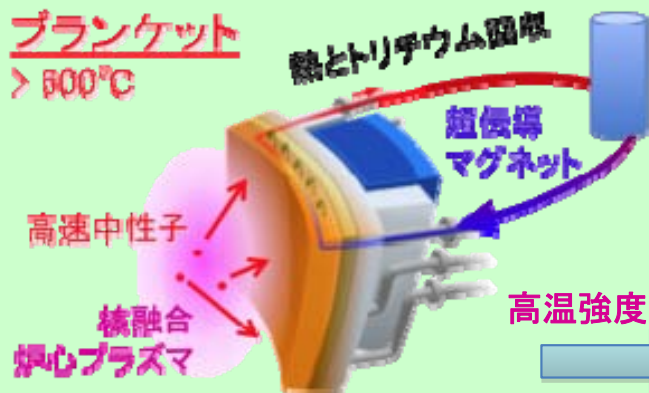
(4) 高熱流プラズマ対向壁研究

◇安定で長寿命の対向壁の提案



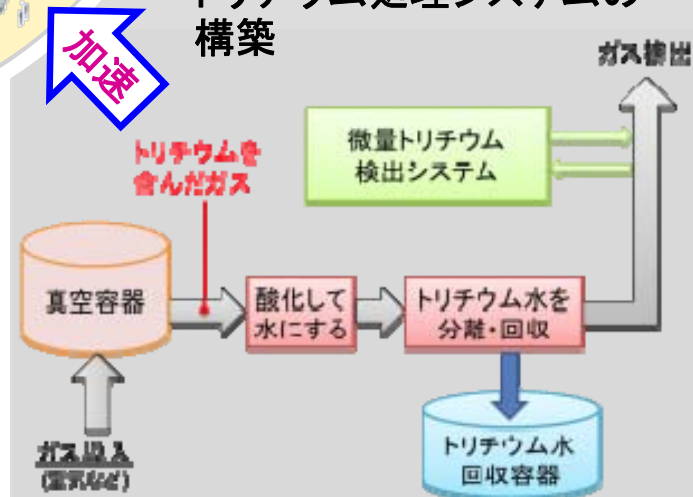
(2) 長寿命液体ブランケット研究

◇安全で長寿命の発電システムの提案



(5) 微量トリチウム管理技術研究

◇高精度で高効率の微量トリチウム処理システムの構築



共同利用・共同研究による加速

核融合原型炉

- 安全・安定の基幹エネルギー
- 国産の世界標準
- 人材育成
- 環境保全



発電100万kW



(3) 低放射化材料研究

高温強度の向上

◇安全で長寿命の材料の開発



核融合科学研究所における炉工学研究の推進計画について

年度2010

2012

2016

2022

炉設計の段階的高度化

概念設計

基本設計



大型ヘリカル装置

超高性能化

革新概念の学術研究

連携

工学基盤の構築

実規模・実環境
工学実証研究

大型高磁場超伝導
マグネット研究



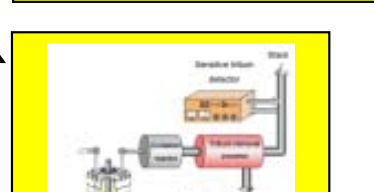
長寿命液体ブランケット研究



低放射化材料研究



高熱流プラズマ対向壁研究



微量トリチウム管理技術研究



寄与

ITER / BA活動：原型炉R&D、概念設計、
JT-60SA、IFMIF/EVIDA

大学等との
共同研究



別事業体による
工学設計

LHD型ヘリカル炉概念設計

赤字:2009年度以降の成果

大型の炉サイズを生かした長寿命構造と超伝導ヘリカルマグネット概念設計の構築

		課題	目標	達成度	今後の方策
1	保守交換	ブランケットの長寿命化	伝熱流動部の 30年間の交換不要	中性子壁負荷1.5 MW/m ² 以下、 スペクトル調整で可能	非スケジュール交換法 の開発
		大口径ポートの確保	炉内ユニット形状の交換	電磁力支持構造最適化で可能	炉内機器形状、支持 構造との整合性確保
2	炉の大きさ	十分なブランケット空間	厚さ1 m 相当の確保	炭化タングステン等先進材料 の併用で可能	材料の組み合わせ、 ラジアルビルド最適化
		蓄積磁気エネルギーの 低減	160 GJ 以下	コイル大半径 16 m程度で可能	ポロイダルコイル配置 の最適化
3	自己点火立 ち上げ	外部加熱パワーの低減	100 MW 以下	立ち上げ300秒以上で30 MW	運転最適化と中性子 工学対策
		高密度運転シナリオ	・熱的不安定性の制御 ・加熱手法の最適化	逆符号PID制御法を開発、 加熱手法との整合性検討	・燃料供給との最適化 ・ポートと保守の最適化
4	中性子工学 設計	中性子の利用効率向上	・全体増殖比 1.15 以上 ・SCコイルに十分な遮蔽	3次元非軸対称計算コード及び 熱流体計算コードの整備	熱流動・構造設計を 含めた更なる最適化
5	超伝導マグ ネット	ヘリカルコイル	・電流密度25A/mm ² 以上 ・ヘリカル巻線の確立	Nb ₃ Al-CIC導体、摩擦攪拌接 合、HTS導体等の提案	ヘリカル巻線方法の具 体化と最適化
		低温支持脚	・一脚 500トン以上 ・SUS以下の熱侵入	LHD型でSUSの1/20達成	耐震設計の高度化

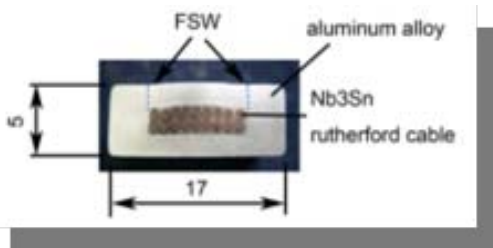
大型高磁場超伝導マグネット研究

赤字:2009年度以降の成果

高磁場・大電流マグネット要素技術の確立と応用研究、実規模試験への工学基盤の構築

超伝導	課題	目標	達成度	今後の方策
原型炉に向けた超伝導技術	1 ケーブルインコンジット低温超伝導導体/コイル	100 kA級ケーブルインコンジット(CIC)低温超伝導導体ヘリカル巻線技術	13 T, 46 kA Nb ₃ Sn, Nb ₃ Al CIC導体はITERで開発 熱処理後巻線によるヘリカル巻線概念の提案	15 T導体試験設備の整備 Nb ₃ Al大電流導体の試作 ヘリカル巻線の原理実証
	2 間接冷却低温超伝導導体/コイル	100 kA級間接冷却低温超伝導導体ヘリカル巻線技術	10 kA級のNb ₃ Sn間接冷却導体試作 熱処理後にAl合金ジャケットに一体化する製造技術を確立 (図1)	10 kA級導体のコイル製作 100 kA級導体の試作 ヘリカル巻線の研究
	3 間接冷却高温超伝導導体/コイル	100 kA級間接冷却高温超伝導導体ヘリカル巻線技術(接続方式)	YBCOテープ線材を積層した10 kA級導体で15 kA @8 T, 20 K 実証 (図2) 線材間接続方式転位型10 kA級導体の試作と液体窒素中での実験	10 kA級導体のコイル製作 100 kA級導体の試作 ヘリカル巻線(接続方式)の研究
	4 超伝導送電	送電と液体水素輸送の一体化技術の開発	核融合炉への適用を想定した概念設計を提案	MgB ₂ 線材の試作 詳細設計の提案
	5 中性子照射効果	先進超伝導材料の放射線影響の実験的検証と機構解明	10 ²² n/m ² までの中性子照射を行い、超伝導特性などを測定 (図3)	重照射材料の臨界電流測定 機構解明
	6 新超伝導材料	低放射化超伝導線材の特性改善, 新製法の開発	V ₃ GaやMgB ₂ のNbを使用しない線材の新製法で性能向上を実証	Nb ₃ Snを超える超伝導特性の達成
	7 超伝導システムの信頼性向上	信頼性の高い超伝導システムの設計・運転技術の確立	LHDにおいて12年間積算で99%以上の稼働率を達成	異常検知や予防保全技術の研究、さらなる信頼性向上
応用研究	1 熱音響技術の応用	パルス管熱音響技術を応用して、冷却システムの高効率化	2 kAのパルス管電流リードの実証 熱音響発電の原理実証	熱音響発電の高出力化と効率向上
	2 クライオターゲット(連携研究)	高速点火レーザー核融合の燃料としてコーン付き固体水素ターゲットの製造技術を確立	固体水素ターゲット可視化技術確立 レーザー加熱による固体層の均一化を実証 (図4)	燃焼実験用クライオターゲットの開発
	3 自励振動ヒートパイプの低温動作特性	自励振動ヒートパイプの低温動作特性を理解して超伝導機器の冷却に応用	ヘリウム、水素、ネオン、窒素などを作動流体として、熱輸送特性の温度・圧力依存性を系統的に実験	配管径、使用圧力など最適条件の導出

図1



間接冷却方式として摩擦攪拌接合によるアルミ合金被覆Nb₃Sn導体の製造技術を確立

アルミ合金被覆の際に、特性劣化が生じないことを10 kA級導体で確認

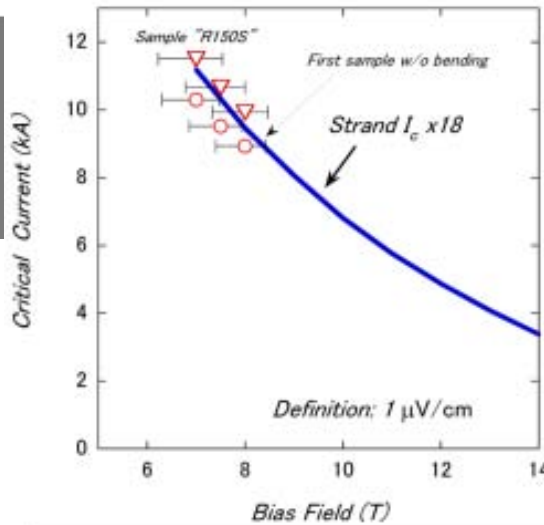


図3

14MeV中性子源で1.8x10²¹ n/m²、原子炉で10²⁴ n/m²までの中性子照射を行い、超伝導特性などを測定

臨界磁場の変化を世界で初めて実測
ITERで使用予定のシアネートエステル樹脂の原子炉照射も実施

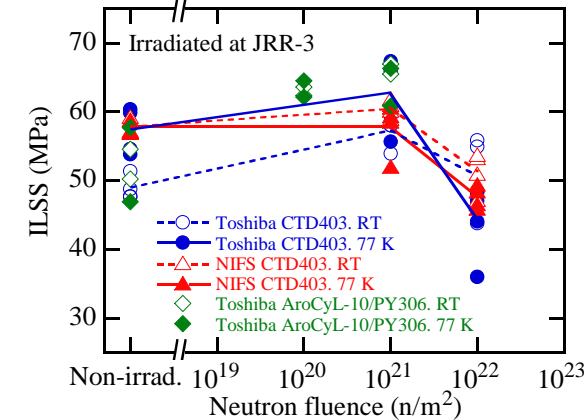
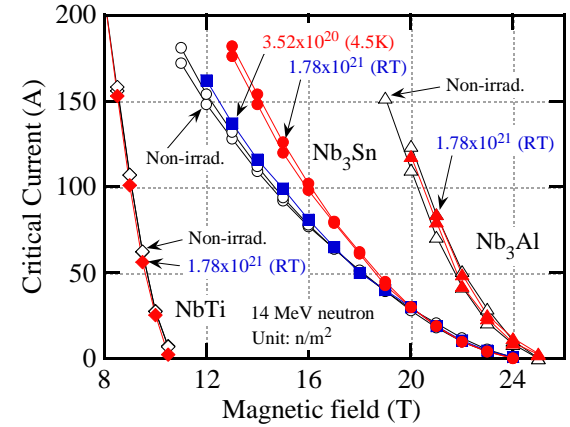
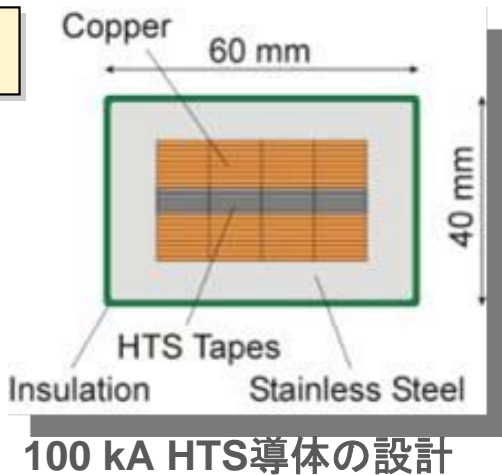


図2



10 kA HTS 導体試験体

高温超伝導導体を並列配置した大電流導体の設計検討
機械強度の高いYBCOテープ線材を用いた10 kA級導体試作を実施し、8 T、20 Kで15 kAまでの通電に成功

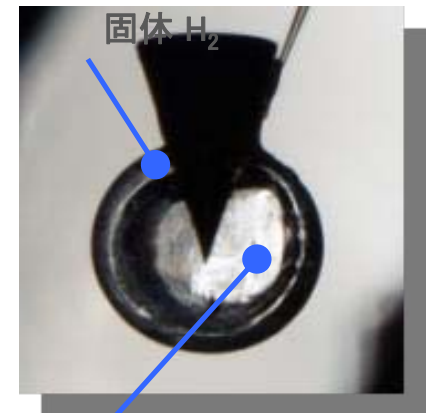
導体接続方式による巻線方法の提案

図4

固体水素ターゲットの可視化技術を確立

コーンをレーザーで加熱することにより固体水素層の均一化を実証

(連携研究)



気体 H₂ (飽和圧力)

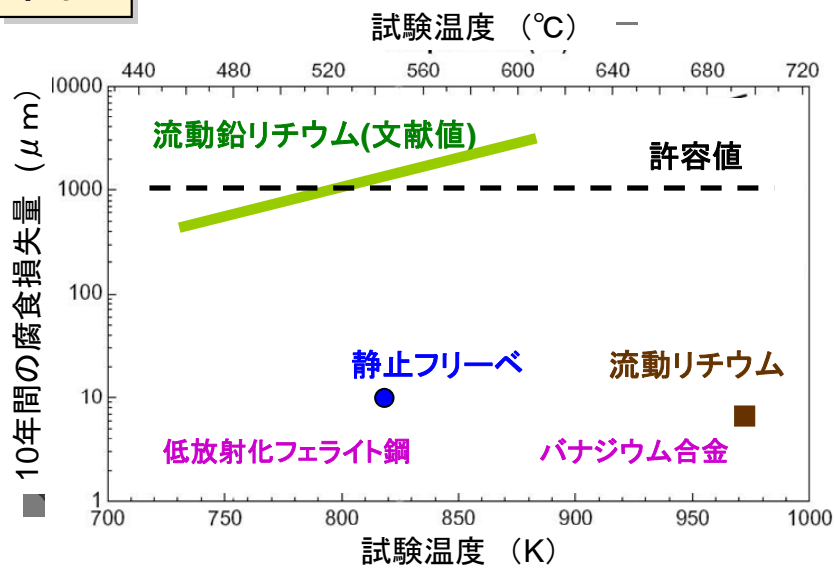
長寿命液体ブランケット研究

赤字:2009年度以降の成果

高温、長寿命液体ブランケット要素技術の確立、実規模・実環境試験への工学基盤の構築

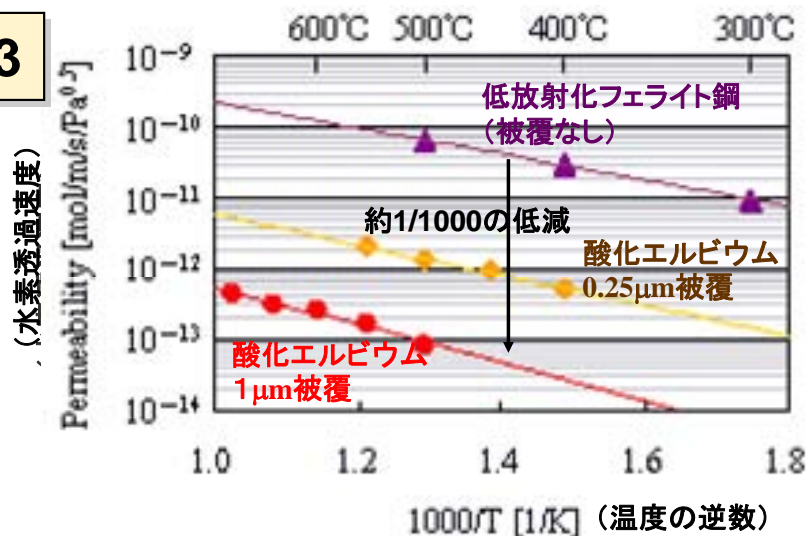
液体増殖材		課題	目標	達成度	今後の方策
液体リチウム	1	バナジウム・フェライト鋼の共存性	700℃、腐食減肉10年間で1mm以下	流動環境で実証(バナジウム合金、フェライト鋼) (図1)	流速効果 温度勾配効果
	2	磁場による流動抵抗低減 絶縁被覆	被覆製作技術確立	小面積で実証、 大面積被覆試作が進展 (図2)	特性評価、複雑表面被覆、補修法
	3	照射下の被覆絶縁性	ブランケット照射環境で $10^{-2}/\Omega\text{m}$ 以下	$10^{-6}/\Omega\text{m}$ 以下を実証	達成済み
	4	被覆材のリチウム安定性	700℃ 腐食減肉10年間で1mm以下	800℃まで実証 (日米協力)	達成済み
	5	リチウムからの水素の分離抽出	1ppm まで低減	ホットトラップで原理実証、流動環境で実証 (九大)	達成済み 機器設計を推進
熔融塩フリーベ・フリナック	1	フェライト鋼との共存性	550℃、腐食減肉10年間で1mm以下	静止条件で実証(フリーベ) 流動環境で実証(フリナック) (図1)	流速効果 温度勾配効果
	2	水素透過防止被覆製作	製作技術確立	小面積で実証、 大面積被覆試作が進展 (図2)	特性評価、複雑表面被覆、修復法
	3	水素透過防止機能	透過速度を1/1000以下まで低減	小面積で1/1000を実証 (東大) (図3)	大面積で実証
	4	被覆照射下寿命	100dpa まで安定	5dpaまで実証 (日米協力)	IFMIFで実証
	5	界面熱伝達の促進	熱伝達率20kW/m ² K以上	小球充填管で10kW/m ² Kを達成(東北大学)	磁場環境で実証
	6	システム統合	熱と燃料水素の回収両立	オロシ・ワン循環ループの設計・製作・試験開始 (図4)	腐食、磁場も組み込んだ統合試験

図1



液体リチウム/バナジウム合金・フェライト鋼、フリーベ・フリナック/低放射化フェライト鋼について、静止環境/流動環境で10年間の腐食減肉 0.1 mm 以下を実証

図3



水素透過防止機能 1/1000を実証

図2

有機金属錯体 + Arキャリアガス
酸素
加熱基板
排気
CO₂, H₂O 分解中間体

ガス蒸着法
ガス吹き出しノズル
焼成法
金属錯体溶液

被覆前
被覆後

被覆後

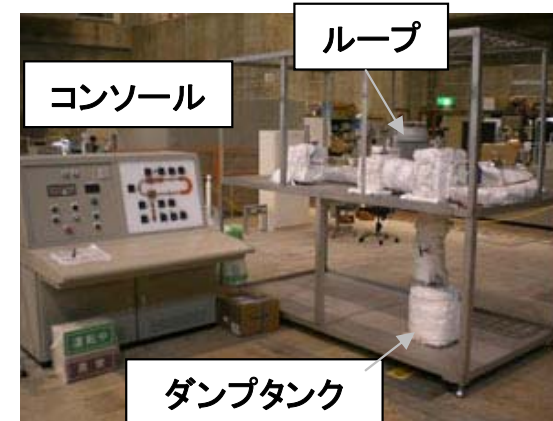
石英管(10mm φ x60mm)内へのEr₂O₃被覆

有機金属錯体を原料としたガス蒸着(MOCVD)法、焼成(MOD)法で配管を模擬した石英管内面の被覆に成功

図4

Orosh²i-1: Operational Recovery Of Separated Hydrogen and Heat Inquiry – 1

Inventory	3 L
Temperature	600°C
Flow rate	0.5-3 L/min
Flow velocity in 1/2 inch tube	0.2-0.5 m/s
Structural material	SUS 316L



オロシ・ワン循環ループの設計・製作・試験開始

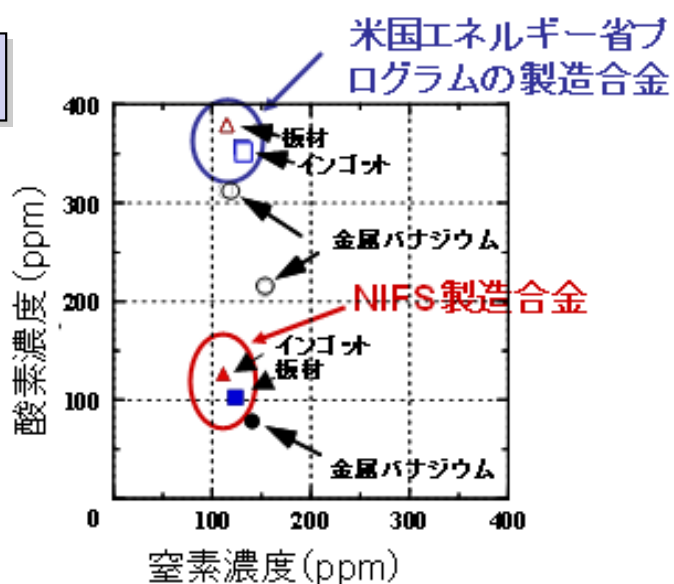
低放射化材料研究

赤字:2009年度以降の成果

低放射化バナジウム合金の高純度化大量溶解により、高温強度、加工製作性、耐照射性を
実証し、ブランケットの高温化、高効率化に寄与する

		課題	目標	達成度(共同研究の相手機関)	今後の方策
1	バナジウム合金	高純度化	O, N 200 ppm 以下	O, N 150 ppm 以下を達成 (図1) (民間との共同研究)	達成済
2		大量溶解法	100 kg 以上の製作手法を 確立	166 kg 溶解に成功、手法確立 (図2) (民間との共同研究)	達成済
3		100 Mpa 以上の 荷重で、10年で 1% 以下の変形	700°C以上で達成	700°Cで達成、粒子分散改良材により 800°Cで達成の可能性を示唆 (図3) (東北大、愛媛大)	粒子分散合金の 系統的な評価
4		加工性	室温大気で薄板・細管加工	実証 (図4) (東北大、福井大)	達成済
5		溶接性	強度の劣化しない溶接性	(広島大、九大)	達成済
6		異種接合	強度劣化の無い接合	純バナジウムを用いた試作に成功 (図5) 接合部の健全性を確認 (図6) (東北大)	特性評価と向上を 今後重点的に推進
7		照射脆化、照射下 クリープの抑制	100 dpa まで抑制	5 dpa まで実証 (日米協力)	IFMIFによる高照射 量試験 (100 dpa)
8		O D S	100 Mpa 以上の 荷重で、10年で 1% 以下の変形	700°C以上で達成	粒子分散により高温化(550°C→700°C)の 可能性を示唆 (図7) (北大、京大)

図1



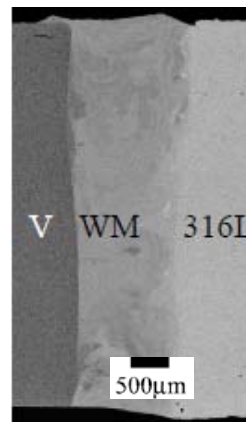
O, N不純物 200ppm 以下を達成

図2



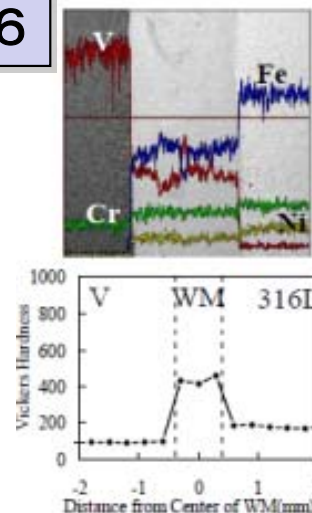
166kg 溶解に成功

図5



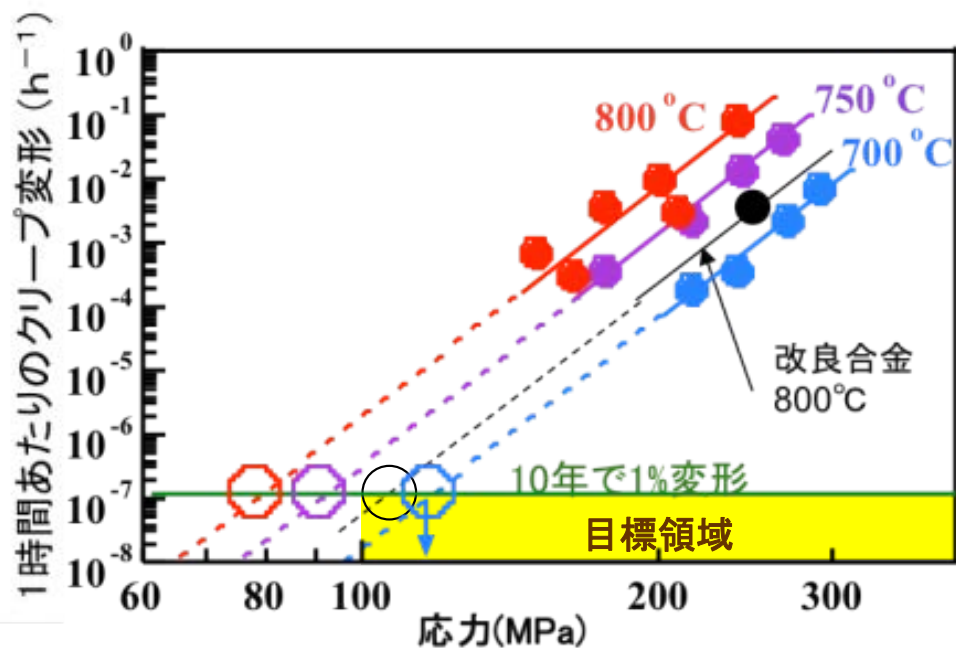
純バナジウムと316ステンレス鋼の溶接材の試作に成功 (21年度成果)

図6



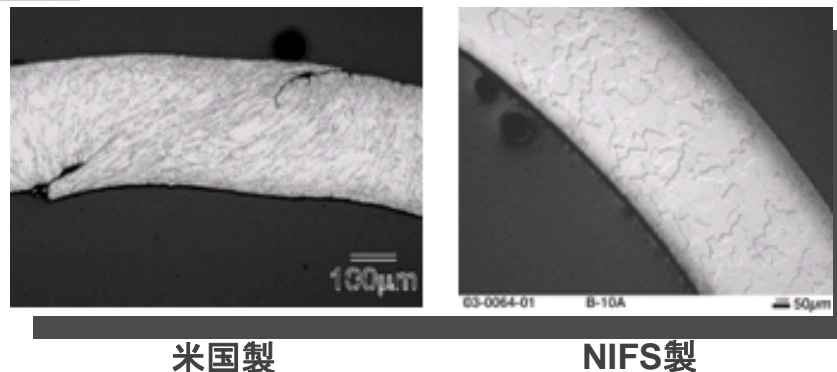
接合部の組成が一樣であり、硬度が許容範囲であることを確認 (22年度成果)

図3



700°Cの使用を可能とする高温クリープ強度 (改良合金は平成21年度の成果)

図4



高純度化により、室温大気での十分な加工性を実証 (細管加工の例)

高熱流[®]プラズマ対向壁研究

赤字:2009年度以降の成果

高熱負荷用ヘリカルダイバータの開発と対向壁中の水素同位体蓄積量の低減化手法の確立

		課題	目標	達成度	今後の方策
超高熱負荷用ヘリカルダイバータの開発	1	タングステンタイル適応の可能性評価	LHDにおけるタングステンの耐熱/粒子負荷特性の評価 10 MW/m ² の熱負荷に対応	タングステンダイバータは耐熱・耐粒子負荷特性に優れているだけでなく、 燃料粒子捕捉量が炭素材に比べて1桁小さいことを明らかにした	除熱性能向上のための冶金技術の確立 ろう付け、HIP、電子ビーム溶接の製作性能試験を行う
	2	3次元形状閉ダイバータの検討	LHDにおける閉ダイバータシステムの開発 1.5 MW/m ² の熱負荷に対応 20 Pam ³ /sの排気速度	LHDにおいて3次元形状の閉ダイバータの段階的改造への 設計・試験活動が進展した	排気システムの開発 LHDはクライオポンプ、ヘリカル炉ではターボ分子ポンプによる排気を検討
水素同位体蓄積の低減化	1	金属壁の粒子損傷メカニズムの解明	LHD対向壁における材料損傷と粒子捕捉特性の理解 照射量 $\sim 10^{25}$ particles/m ² 以上の欠陥形成過程の理解を目指す	ヘリウムによる材料損傷と粒子捕捉の 原子レベルでのモデル化が進展	欠陥形成の少ない材料の開発 500°C以上でHeと水素同位体同時照射環境下における評価試験
	2	壁コンディショニングの最適化	水素捕捉量の低減化のためのLHDにおけるグロー放電洗浄技術の確立 水素同位体捕捉量は $\sim 10^{19}$ particles/m ² 以下を目指す	LHDにおいて 壁コンディショニングの課題を探り当て、その具体的解決方法を示した	より水素捕捉量の少ない壁材料の検討と効率的な壁コンディショニング法の確立 動作ガスだけでなく、壁温を変えてのグロー放電洗浄を実施

微量トリチウム管理技術研究

赤字:2009年度以降の成果

微量トリチウム管理技術の構築

項目	課題	目標	達成された成果	今後の課題
トリチウム 検出	1 水素/トリチウムの回収	プロトン導電体を用いた 低濃度トリチウムの回収 (10^{-4} Bq/cm ³)	低濃度トリチウム (10^{-3} Bq/cm ³) 回収 を実証し、同位体効果を明らかにした	トリチウム回収性能改 善に向けた新規プロト ン導電体の探索
	2 連続トリチウムモニタ	低濃度トリチウムの検出 ガス状: 2×10^{-4} Bq/cm ³ -gas 水状: 6 Bq/cm ³ -water (10分)	2×10^{-4} Bq/cm ³ -gasを1時間で測定、 10 Bq/cm ³ -waterを約3時間で測定	S/N比改善による 計測時間の短縮
生体遮蔽	1 核融合中性子の遮蔽と 作業環境の安全管理	作業エリアと事業所境界の 線量を現行法規制限度 (0.025mSv/h)内とする 建屋遮へい壁厚を設計	炉建屋に2m厚のコンクリート壁では 法規制の観点からは不十分	炉室外を作業場所と するために必要な 壁材/仕様の最適化
トリチウム 安全処理系	1 低圧力損失な酸化触媒/ 吸湿剤の開発	大流量処理トリチウム除去系 (>10000 m ³ /h)の開発	ハニカム型試料の特性を評価、低圧力 損失かつ高吸着速度を明らかにした	ハニカム型触媒/吸湿剤 組み合わせシステム 評価
	2 先進的なトリチウム 回収システムの開発	先進的なトリチウム回収シス テム設計計算コードの確立	システム設計計算コードの開発に着手 、 膜分離法の非定常計算コードを開発 (名大)	各構成機器の計算 コード開発と実証試験
	3 トリチウムの吸着脱離 と除染	材料中トリチウムの吸着脱離 特性の解明	各種金属材料(SUS, W, 等)を用いた水 素同位体の吸脱着特性評価を進めた (北大、富大)	トリチウムの物質移動 機構解明と除染方法の 確立
トリチウム 環境動態/ 生体影響	1 生物学的影響	トリチウムのような低線量 放射線の生物学的影響の解明	実験用マウスによるトリチウム生体 影響実験システム確立、実験評価開始 (産医大)	トリチウム生体影響の 機構解明に迫る
	2 トリチウムの環境動態	大気/河川/有機物を含む複合 環境下でのトリチウム動態の 観測と環境評価モデルの開発	河川/大気中トリチウム濃度測定、 大気-土壌系環境動態モデルの開発に着 手(京大)	環境測定の継続と 大気-土壌-有機物系 環境動態モデルの構築



ITER / BAへの寄与

NIFS・大学等

学術研究

- 金属管に超伝導線を入れた高磁場導体を含む、各種の原型炉用超伝導導体を対象とした幅広い学術研究

- 各種の原型炉設計に関する学術研究
- NIFS・大学施設を有効活用した柔軟で迅速な実験研究による工学基盤の構築

- 高効率な長寿命液体ブランケットを 目指した研究
バナジウム合金、ナノ粒子分散強化、液体増殖・冷却ブランケット、等

寄与

相補的

ITER / JAEA

開発研究

- 金属管に超伝導線を入れた高磁場導体の製造技術開発

BA六カ所サイト

- トカマクに特化した設計やシミュレーション
- 長い時間と多くの人手を要する工学R&D施設の建設
⇨ NIFS・大学が築く工学基盤に基づく実証研究を実施

- 現有技術に基づく固体ブランケットの開発
フェライト鋼、固体増殖、水冷却ブランケット、等のR&D