

日本原子力研究開発機構機関リポジトリ Japan Atomic Energy Agency Institutional Repository

Title	IFMIF/EVEDA リチウムターゲットシステムの開発
	若井 栄一, 近藤 浩夫, 杉本 昌義, 深田 智, 八木 重郎, 井田 瑞穂,
	金村 卓治, 古川 智弘, 平川 康, 渡辺 一慶, 藤城 興司, 鈴木 晶大,
Author(s)	寺井 隆幸, 枝尾 祐希, 廣本 鉄史, 重春 諭志, 新妻 重人, 木村 晴
	行, 堀池 寛, 帆足 英二, 鈴木 幸子, 山岡 信夫, 芹澤 久, 川人 洋介,
	辻 義之, 古谷 一幸, 武尾 文雄
Citation	プラズマ・核融合学会誌,88(12),p.691-705
Text Version	出版社版
URL	https://jopss.jaea.go.jp/search/servlet/search?5039005
DOI	2022.9.6 現在なし
Right	プラズマ・核融合学会

業 解説

IFMIF/EVEDA リチウムターゲットシステムの開発

国際核融合材料照射施設(IFMIF)の工学実証・工学設計活動(EVEDA)を2007年より実施している.この 中でリチウムターゲット(標的)施設の研究開発は実施機関として2010年度に世界最大の5,000ℓの液体リチウム 試験ループを完成させ、各機器の機能性試験およびそれに続く、ターゲット部のリチウム自由表面流15m/sの流 動試験までの第一段階確証試験を成功させたところである.また、リチウムターゲットに係る工学実証試験や工 学設計の活動とその成果を概説するとともに、関係する液体リチウム関連技術への波及効果等についても併せて 言及する.

Keywords:

IFMIF/EVEDA, IFMIF, Lithium target, EVEDA Li test loop, purification, Tritium, Y trap, N trap

1. IFMIF/EVEDA 事業の概要

核融合原型炉の構造材料等は運転中に、中性子フルエン スが10 MWa/m²以上で中性子壁負荷が3.5 MW/m²(ピー ク値:5 MW/m²)となる約14 MeV のエネルギーを持つ中 性子環境下で使用される[1]. このような環境下で使用す る材料は弾き出し損傷が生じるとともに、核変換元素であ るヘリウム(He)や水素(H)等が生成され、材料の延性等の 特性は徐々に劣化していく[2-18]. 核融合炉原型炉を開発 する上で、これらの材料特性変化の挙動予測を正確に行う ことは重要な課題となっている. 図1に21世紀中葉に核融 合の実用化をめざした開発ステップの考え方を示す[19]. ここでは ITER と原型炉および原型炉のための工学研究活 動の間の関係を示しており、国際核融合材料照射施設 (IFMIF)は開発ステップ上、重要な施設に位置づけられて いる.

IFMIF は原型炉 (DEMO)の材料を中心とした照射によ る特性変化の挙動予測評価に必要な,核融合炉に匹敵する 高強度で且つ炉環境を模擬する中性子照射場を提供するこ とを目的として,開発を進めている加速器駆動型の中性子 照射施設である. IFMIFの概念形成はIEA活動の下で1993 年から開始され,2003年12月にまとめられた Comprehensive Design Report[20] (CDR) に詳述されており,その概 要は本学会誌でも紹介されている[21,22]. IFMIFの建設 に向けた工学設計と主要機器の工学実証活動(EVEDA) は,幅広いアプローチ活動[23]の一環として2007年6月よ り日欧で開始された.また,IFMIF/EVEDA事業では,将 来,IFMIF 建設を判断するために必要となる IFMIF の工 学設計を行うとともに,その重要構成要素について,設計 の裏付けとなる実証試験データの取得をめざしている.

D-T 核融合により発生する 14 MeV 中性子は, 材料中の 原子との核反応による核変換やH, Heなどのガス原子を生 成する能力が高いため, 照射場の性質は, 散乱衝突で生じ る弾き出し損傷と核変換の効果の配分が実際の環境に近い ことが要求されるとともに, パルスビームでなく, 連続 ビームが必須の条件としてユーザーズコミュニティから要 求されている. He などの希ガス元素は材料の特性(延性低 下, 延性脆性遷移温度の上昇やスエリング促進など) に大 きな影響を及ぼすことが知られている[10-14]. ここ数年

Development of Lithium Target System in Engineering Validation and Engineering Design Activity of the International Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF/EVEDA)

WAKAI Eiichi, KONDO Hiroo, SUGIMOTO Masayoshi, FUKADA Satoshi, YAGI Jyuro, IDA Mizuho, KANEMURA Takuji, FURUKAWA Tomohiro, HIRAKAWA Yasushi, WATANABE Kazuyoshi, FUJISHIRO Kouji, SUZUKI Akihiro, TERAI Takayuki, EDAO Yuuki, HIROMOTO Tetsushi, SHIGEHARU Satoshi, NIITSUMA Shigeto, KIMURA Haruyuki, HORIIKE Hiroshi, HOASHI Eiji, SUZUKI Sachiko, YAMAOKA Nobuo, SERIZAWA Hisashi, KAWAHITO Yosuke, TSUJI Yoshiyuki, FURUYA Kazuyuki and TAKEO Fumio corresponding author's e-mail: wakai.eiichi@jaea.go.jp



図1 21世紀中葉の実用化をめざした核融合研究開発の開発ステップ[19].

の中で様々な照射試験施設による核融合炉材料の照射損傷 評価を実施する計画が諸外国で立案され、He(または H)の生成量と照射損傷量の比率を核融合照射環境の条件 (低放射化フェライト鋼の場合,約 10 appm-He/dpa,約 40) appm-H/dpa) に近い条件を設定できるものもあるが、核 破砕ターゲット照射の場合、発生する中性子のエネルギー が高いため、その他の核変換生成元素やその生成量に大き な違いが生じる.例えば、25 dpa まで照射を受けた場 合、核融合照射環境下(IFMIF含む)では考えられな い、ケイ素、リン等の元素が 10 wtppm 近く生成すること がわかっており、これらの元素は微量でも材料強度特性に 悪影響を及ぼすことが一般的に知られているため、そのよ うな照射環境で得られた結果を評価する場合、十分な注意 を払ってその有効性などを判断する必要がある. さらに, 核破砕ターゲット照射はパルスビームであり、照射欠陥の 発達過程が異なることも考慮する必要があるので、照射に よる材料強度特性の推移を高精度に評価するには、少なく とも上記2つの点からもよい方法ではないと考えられる.

照射効果は材料の温度に大きく影響されるため,照射に よる核発熱が照射の有無で変動すると材料温度を一定に保 つことが困難になり,照射データの質が低下する.このた め,中性子強度の安定性(照射装置の高い信頼性)が要求 される.IFMIF/EVEDAの活動を通して取り組んでいる 技術的な課題は,(1)核融合炉に匹敵するような強大な強 度の中性子場をコンパクトに実現し,(2)定常的な中性子 場を長期間安定に維持することに集約される.IFMIF は 40 MeV,250 mA(125 mA×2基)の大強度定常重水素イ オンビームを発生する加速器系[24-29],重水素(D)との核 反応により中性子を発生するリチウム(Li)ターゲット(標 的)系[28-33],および照射試験設備系の施設から構成され る[28,29,34-36](図2参照).また,IFMIFで照射した材 料の強度特性等の評価を実施する照射後試験施設も併せて 設計や試験検討等[37-40]が進められている.

2012年4月時点でのIFMIF/EVEDA事業の概略スケ ジュールを図3に示す.各施設のテーマごとに国内の大学 との連携を図り,いくつかの共同研究として様々な評価を 進めてきた.2007年の開始当初,6年間の計画で工学実証 と工学設計を完全に完了する予定であったが,原型加速器 の開発・製作に時間を要しており,日本原子力研究開発機 構(JAEA)青森研究開発センターでの加速器の実証試験を





図3 IFMIF/EVEDA 事業の概略スケジュール.

2017年半ばまで延長した.また,JAEA大洗研究開発セン ター内に建設したLi試験ループは東日本大震災(大洗地区 では震度5強)の影響で1年半程度の遅れが出たため,運 転試験を2014年半ばまで延長する予定である.その他の活 動は概ね,当初予定どおり2013年半ばに終了の予定である が,試験設備テーマ関係の一部であるベルギーBR2炉で の照射する試験用モジュールなどの製作完了が遅れている 状況にある.ただし,工学設計活動は2013年半ばに完了と なるが,設計を裏づけるために予定していた実証試験がそ れまでに完了しないため,中間工学設計という形を取るこ とになっている.設計書は3つの設計フェーズ(設計要求 /詳細設計/総合設計)を経て作成する.以下にそれぞれ の実証試験の概要を示す.

1)加速器系: 要求仕様である 40 MeV/電流 125 mA の連続ビームを加速するには,空間電荷によるビーム発散 力が大きい低エネルギー部の実証が重要であるため,図2 に示した超伝導加速器初段までを原型加速器として製作・ 運転試験を行う.図4に,青森研究開発センターに建設し た加速器試験棟の外観および2013年以降に順次納入される 主な機器を示す.ビーム試験に伴う放射線遮蔽評価に必要 なデータの整備を九州大学との共同研究で実施した.日本 が担当する中央制御・安全系の設計とレビューが完了し, 試作機による接続確認試験が進行中であり,実施に向けた Commentary



図4 IFMIF/EVEDA 原型加速器試験施設.

作業に移行しているところである.2013年には高周波四重 極加速器の部分モジュールの電界印加試験が予定されてお り,日本が分担納入する高周波カプラーの大電力試験と組 み合せて欧州で実施する予定である.

2) Li ターゲット系: Li 試験ループは2010年11月末に完 成し、2011年12月から2月末まで試運転として機能試験を 実施した直後、2011年3月11日に東日本大震災による被害 (主に支持構造部のブレスの変形など)を受けたため、復旧 工事の終了まで1年間を要した。2012年の7月末までに震 災前の状態に復帰させるとともに、各種機器の詳細な機能 性確証試験を実施した.今後,最大機能実証試験を経て安 定動作確認試験に至る計画である. さらに、大阪大学と JAEAの共同研究で標的のLi流動解析,名古屋大学と IAEA 間ではLi自由表面流の解析と評価および計測法の開 発,東京大学と九州大学と JAEA の間では水素トラップと 水素モニターおよび窒素(N)トラップを主体とした純化系 システムや純度監視系システムの開発、さらに大阪大学と 八戸工業高等専門学校とJAEAの間では遠隔操作システム 開発等の研究開発に取り組んでおり、交換機器に平板部 (厚さ2mm)を設け、それ同士の溶接および切断に最新の ファイバーレーザー技術を適用した遠隔操作技術の実証試 験などを実施しており、EVED ALI 試験ループ(ELTL) での実証試験等とともに,これらの成果や知見を工学設計 書へ反映させているところである. 一方, 欧州は Li ループ 中で発生する可能性があるキャビテーションに対する検出 器や,Li中の不純物をオンラインで計測する抵抗計等の準 備を進めている.

3) 試験設備系: 高中性子束領域の試験モジュール (HFTM) 等の照射設備機器をベルギーの BR 2 炉を用いて 照射する試験を今年度内に実施する予定である. ドイツ カールスルーエ工科大学(KIT)では大型の He ガスループ を用いて原型 HFTM に対する段階的なアセンブリ試作機 の流動試験が進められ、京都大学では高温照射用に開発中 のHFTM 原型モデル体を製作して、N2 ガス流動下でその 機能性評価試験を進めている. また, 微小試験片試験技術 開発では、疲労試験に関しては東北大学と核融合科学研究 所 (NIFS) と JAEA の共同研究で試験片の形状効果とサイ ズ効果, さらには試験装置開発と計測限界評価等を進め, 破壊靭性試験に関しては京都大学・東北大学とJAEAの共 同研究で同様な研究開発を進め、き裂成長速度試験に関し ては八戸工業大学と JAEA が共同で研究を行ってきた.こ れらの EVEDA の活動で得られた新しい知見に基づい て、IFMIFで用いるべき試験片の形状や試験装置やその使 用環境および、試験方法などについて、今後に取り組むべ き課題を示すとともに,照射モジュールや関連する照射後 試験施設の設計が纏められつつある.

4)工学設計: 事業目標では「IFMIFの詳細・完全・且 つ十分に統合された工学設計」を行う計画であったが、上 記の工学実証試験の計画が遅れ気味であるため、「中間的 IFMIF工学設計報告書として纏める」ことに目標を変更し た.3つの設計フェーズ(設計要求/詳細設計/総合設計) を経て、2013年6月末までに完了させる予定で進めている.

2. Li ターゲットの概要

IFMIF での中性子発生方法は D-Li 反応を用いた加速器 駆動システムを採用する.ターゲットとなる液体Liは中性 子発生効率に優れ、常圧453.5Kで液化し、熱輸送媒体とし て利用しやすいことから選ばれている.D-Li 反応による中 性子は、鉄鋼材料の場合、Dビームのエネルギーが30~40 MeVの場合に丁度, 14 MeV 中性子と同等の照射効果をも たらすこと、ビームエネルギーが大きいほど中性子強度が 飛躍的に増加することから, IFMIF では 40 MeV の D イオ ンのエネルギー条件が採用されている.図2に示した試験 設備における中性子強度と照射体積の要求を満足するに は、電流は 250 mA 以上が必要であり、その形状は幅 200 mm で高さを 50 mm とした.加速器は技術現状から、2 台 の125mA線形加速器を並列で使用することにしている. もし1台が故障した場合,もう1台で照射を継続できると いう利点がある.このビームを受けるLiターゲットの要求 仕様は、40 MeV の D の Li 中の飛程が Li 表面から 22 mm であり,除熱するために,幅260mm,厚み25mm,流速 15 m/秒となる. このように IFMIF では入射ビームの入熱 量(5~10 MW)が非常に高いため、水銀を用いた核破砕標 的は日本の J-PARC [41] や米国の SNS [42] の入熱量はそれ ぞれ1MWと2MWに比べて高く, 鉛ビスマスを用いた液 体標的としたスイスの SINQ [43] でも1 MW であり、これ らの核破砕標的では液体金属を容器で覆った構造を採用し ているのに対して, IFMIFではLiターゲットでは液体金属 流が片面であるが、自由表面を持つシステムになっている ことがその特徴といえる.



IFMIF のターゲット施設で必要なシステムの概念図を

図5 リチウムターゲット施設の概念図.

図5に示す.ターゲット施設は、Li標的,背面壁,ノズル 絞り,ビームダクト,Li循環ループ,クエンチタンク,電 磁ポンプ,熱交換器,Li純化系システム(コールドトラッ プ,Nホットトラップ等)や純度監視系システム(Nトラッ プモニター,コールドトラップモニター,水素トラップモ ニター,抵抗計等)から主に構成される.ターゲットアセ ンブリの背面壁の形状やLiターゲット用ノズル設計の検討 は井田らによって行われ、ノズルは整流器を通した後に2 段階で絞った構造を採用している[44,45].また,**表1**に は、IFMIFのLiターゲットに要求される主要な仕様項目と 性能値を纏めた.ここでは IFMIF 用 Liループ, IFMIF/ EVEDA で設計・製作した ELTL,阪大やロシアのLiルー プの仕様の比較を与えた.

3. 試験ループ建設および Li 循環試験結果

3.1 EVEDA Li 試験ループ(ELTL)の工学設計と建設 ELTL の工学設計においては,機構の保有する液体金属

試験設備の知見を活用し、系統設計、機器構造の設計が行 われた. ELTL の装置規模は実機の約 1/3 としたものであ り、試験部において実機と同等の最大流速 20 m/秒もの高 速でかつ,自由表面を有する安定なLi流れを生成させるこ とが重要な課題である.表1で示した ELTL の主な仕様条 件は2004年に作成された CDR で纏められた物をベースに 実機の1/3サイズとしており、次のステップとして製作の ための詳細設計の前段階としてLi試験ループの基本検討を 2008年に行い,その設計の基本部を定めた(表2~3を参 照).また,ELTLの工学設計では、この評価等をベースに して翌年から設計・製作を開始した.この際に適用した法 規は消防法であり,参考した規格は,圧力容器構造規格 (2003(平成15)年4月30日厚生労働省告示196号), JISB 8265-2003 圧力容器の構造 - 一般事項, JISB 8280-2003 圧力 容器の構造 – 特定規格, 並びに JIS B 8280-2003 非円筒胴の 圧力容器の4つであった.この中でターゲットアセンブリ は ELTL の主要の構造物であり、その構造図を図6に示

表1	国内外における大型の液体 Li ルー	プー	覧.
----	--------------------	----	----

	IFMIF 実機	IFMIF/EVEDA Li 試験ループ(ELTL)	ロシア (SSC RF - IPPE)	国内(大阪大)
冷却材	Li	Li	Li (水)	Li
ノズル設計	2段階の予定	2 段階	2段階	2段階
背面壁	Concave R=250 mm(の予定)	Concave R=250 mm	Concave R=250 mm	Rectilinear
Liジェット厚さ (mm)	25	25	10 (8)	10
Liジェット幅, (mm)	260	100	70 (76)	70
最大Liジェット速度 (m/s)	20 (または15)	20	20	15
流量率 (L/s)	133	50	13	13
圧力 (Pa)	10 ⁻³	$10^{-3} - 10^{5}$	$10^{-3} - 10^{5}$	10 ⁵
Li 温度(K) (ノズル出口にて)	523	523 - 673	523 - 673	573
ターゲットアセンブリ 材料	低放射化フェライト鋼(の予定)	316 L (または低放射化フェライト鋼)	12X18H10T*	304 SS
運転時間 (h)	175200(目標値)	>5000	>1000	1000
状態	工学設計書を作成中 (2013年6月に中間工学設計書(予定))	2011年から (震災復旧後, 現在)稼働中	2005年から 稼働中	2002年から 稼働中

表2 工学設計のための基本検討項目の分類.

主検討項目		検討対象のシステム
A.系統配置の基本検討	1.主要仕様	1.1 ターゲットアセンブリ仕様
		1.2 主循環系の仕様 (サブシステム:クエンチタンク, 主循環ポンプ, 流量
		計, 冷却器, サージタンク, ダンプタンク)
		1.3 純化系・純度監視系の仕様 (サブシステム:コールドトラップ, コール
		ドトラップ用エコノマイザ,純度監視系サンプリング管)
		1.4 ガス真空系仕様
		1.5 各系統共通仕様(サブシステム:弁,配管,予熱・保温設備,支持架台)
	2.全体基本検討	2.1 全体系統図, 2.2 主循環系系統図, 2.3 純化系系統図, 2.4 純度監視系
		系統図, 2.5 真空排気系系統図
	3.基本配置検討	3.1 全体配置図
	4.全体インベントリ検討	4.1 系統毎および全体インベントリの検討
	5.各系統にかかる検討	5.1 試験ループ系統圧力損失評価, 5.2 電磁ポンプ流量特性, 5.3 ヒートマ
		スバランス, 5.4 主循環系ドレン, 5.5 冷却器容量, 5.6 コールドトラップ
		設計, 5.7 真空排気系の排気ダクト径, 真空ポンプ排気速度
B. 電気設備の基本検討	1.必要電力量概算評価, 2.	予熱容量, 3. 単線結線図
C.架台構造に係る基本検討	1.既存施設の地中梁への負荷	5等
D. 運転手報の基本検討	1.安全保持インターロック系	系, 2. 切替運転手法, 3. 純化系流量制御性, 4. 運転手順, 5. 制御/監視シ
	ステム	

す.このアセンブリに対して熱応力解析をするため,計算 コードとして ABAQUS 等を用いて様々な設計条件をパラ メータにして慎重に最適な設計が得られるように応力解析 などを進めた.ここではその結果の詳細は割愛するが, ターゲットアセンブリの温度分布,応力分布,および変位 分布の計算結果はいずれの分布もわずかな変化しかなく, 良好なものであると判断された.なお,ELTLの建設設計 および建設は,三菱重工メカトロシステムズ(旧神菱ハ イッテック)によって行われた.

ELTL の製作にあたり、特に、ターゲットアセンブリの 製作がその構造の複雑さのため、製作方法の検討が必要で あった.最大の課題は、加工のきわめて困難な、ステンレ ス製のターゲットアセンブリの背面壁やノズルなど (図6)を高精度に加工し、溶接施工する工程である.これ に対し、背面壁を加工の基準とする設計思想を導入するこ とによって、これを克服することに成功した.具体的には、 基礎となる鋼板に流体計算から決定された背面壁の座標を 高精度5軸加工器にて切削する.それと同様に5軸加工機 で加工したノズルをボルト固定し, Liのバウンダリになる 部分にシール溶接を施す.これにより、背面壁、ノズルと も高精度加工並びに加工後の3次元の形状計測ができるこ ととなり、加えてボルト固定とすることによって、溶接に よる歪みを防ぐことのできる設計並びにその製作に成功し た(図7). また, IFMIF のための Li 流動挙動に関する実 証試験するためには真空下で実施する必要があり、このた め、Li 蒸気を捕獲し(真空ポンプに到達させない)且つコ

ンダクタンスの小さい蒸気トラップの設計を考案する必要 があった.また,EVEDAリチウム試験ループでは,真空 条件だけでなく,Ar雰囲気の正圧下でも流動試験を行う ため,ターゲットアセンブリの繋ぎ部の下流にクエンチタ ンクと呼ばれる部分を設け,Arガスのリチウムへの巻き こみを防ぐ設計が施されている.リチウム流の中にArガ スを巻きこむとキャビテーション等の現象が生じ,配管や 機器類の破損を引き起こす原因となるため,これを防ぐよ



図6 Li ターゲットアセンブリ構造図.

表 3	工学設計のためのター	-ゲットアセンブ	゙リ,	循環系,	電磁ポンフ	゚などの主要な基	本仕様.
-----	------------	----------	-----	------	-------	----------	------

仕様項目	仕様条件
設計圧力,設計温度	−0.1~0.75 MPa,G, 673 K
ターゲット部流熱速	定常時 15 m/s,最大 20 m/s(制御範囲:5~20 m/s)
使用流体	液体 Li
自由表面Li流幅(ノズル出口)	100 mm ± 0.1 mm 以内(IFMIF 実機の約 1/3)
自由表面Li流厚(ノズル出口)	25 mm ± 0.1 mm 以内
Li流入口温度	523 K~573 K(制御範囲:473 K~623 K)
自由表面真空度	10 ⁻³ Pa 以上
ターゲットアセンブリの材 質,表面粗さ	SUS316L, 6.3 µm (▽▽▽ Li 接液範囲)
計測監視孔 (窓)	7 箇所(フランジ閉止構造),フランジはシール溶接構造を採用
排気系到達真空度	10 ⁻³ Pa (定常運転時),到達時間:24時間以内
ノズル	4B(Li入口ノズル, 真空排気ポート), 10B(Li出口ノズル)
主循環系配管	8B sch20:1.2 m/s(37.5ℓ/s), 1.5 m/s(50ℓ/s), 4 B sch20:4.2 m/s(37.5ℓ/s), 5.6 m/s(50ℓ/s), (補足: 配管口径増大は, Liインベントリの増加を招く)
循環流量	定常時 37.5 ℓ/s, 最大 50 ℓ/s
純化系および純度監視系配管	1B sch20:3.0 m/s (37.5ℓ/sの5%の場合),0.6 m/s (37.5ℓ/sの1%の場合). 4.1 m/s(50ℓ/sの5%の場合),0.8 m/s(50ℓ/sの1%の場合).コールドトラップ検討結果の0.2ℓ/s時は 0.3 m/s.
配管の肉厚	8B:6.5 mm, 4B:4.0 mm, 2B:3.5 mm, 1B:3.0 mm(製品肉厚(sch20), (告示501号第58条(第3種管)に準拠)
電磁ポンプ仕様	6 kg/cm^2 (573 Kの循環ループで最大流量 50 ℓ /sの下,キャビテーションが発生しない条件) ここではクエンチタンクから電磁ポンプの配管(8 B Sch20)を対象評価.なお、クエンチタンク液面圧力は標的アセンブリと同圧で 1×10 ⁻³ Pa とする.400 V, 750 KVA.
Liのインベントリ	5000ℓ (523 K 換算. 2600 kg 相当),系統内充填 Li インベントリ:4350ℓ (10% のマージン含む),ダン プタンク内残存量:750ℓ
必要電力総量	最大電源容量(正味):約1100 KVA(各設備に対して不確定要素を考慮し,20%マージンを見込み設定). なお,運転モードにおける電源容量の概要:最大電源容量:約910 KVA.(内訳:動力用電源の電磁ポンプ用750 KVA,その他用59 KVA,およびヒータ用電源110 KVA)



図7 ターゲットアセンブリの製作,据付の過程および格納容器内に設置したターゲットアセンブリの様子.

うに設計を施している.ターゲットと呼ばれる試験部は, 主ループにおいて電磁ポンプで循環させたリチウムを整流 器に通過させた後に、2段階に絞った構造を持つノズルを 通過させて 20 m/s まで加速させ,背面壁 (流路) に沿って 流すようにしている.ノズル近傍の構造などは 20 m/s と いった高流速における腐食又は壊食を考慮するとともに, 設計圧力に耐える肉厚の設計がなされている.また,純化 系システムとしてコールドトラップ[46],Nホットトラッ プおよびプラギング計の設計・製作を合わせて実施した. コールドトラップ装置では、約48時間の間にリチウム中の 酸素濃度を 10 wppm まで除去できるように設計製作され, 酸素のゲッター材としては SUS304を採用している.この 他に、腐食などに影響しうるNを除去するためにFe-Ti 合金をNトラップ材料としてNホットトラップを基礎段階 から研究開発を始め、その結果を基にして機器の設計と製 作を実施した.ただし、Nホットトラップは現在、概念的 な開発段階の機器であり,確立した技術的なノウハウが存 在していないこと、また、使用温度がLiループ本体に比べ てかなり高い873K程度であることなどから、その使用方 法や本体のLiループへの取り付け方法,および運転方法を 決定していくためには、事前に十分な機能性試験を経て行 う必要があると考えられる.現在までにNホットトラップ の機器配管配置設計のために必要な熱応力計算などを行っ ているが、設計応力を満足するためには当初予想していた 配管長よりもかなり長くなることがわかった.これに伴 い,Liバルブやサポート機器の大幅増加や、ヒーター類な どを含めた制御機器類は大幅な増加が生じることがわかっ た. これらの解析から, N ホットトラップ機器については, まず、単体にて十分な機能性試験を実施し、その有効性や 安全性を十分に確認することが不可欠と判断され、その試 験準備を進めているところである.一方,水素トラップや 水素計測用モニター類については,ELTLの運転に際し て,特に問題となることはないが,実機のIFMIFでは,H トラップ関係機器が必要となる.このため,ELTLでも付 属機器として取り付け等を検討してきたが,必ずしもLi 流動試験には不可欠でないため,水素トラップ機器に関し ては現在の所,基礎工学設計までの範囲まで進めることに した.なお,Nホットトラップと水素トラップに関する基 礎的な研究内容については,後述の3節で詳細を述べるこ とにする.

するビューポートがある)



図8 世界最大の液体リチウム試験ループと主要構成機器.

Commentary

ELTL 全体の設計は、世界初となる部分が多かったが、 様々な技術的な困難を乗り越えながら建設工事を2009(平 成21)年11月から開始し、2010(平成22)年11月に建設を 完了させた後、各種総合機能性確証試験を実施し、十分な 機能を持つ施設であることを2011(平成23)年3月上旬ま でに実証した[47,48](図8)(装置のサイズ:高さ20m× 幅 15 m×幅 15 m).

Liの漏洩対策としては、Liが流れるすべての配管や容器 類に対して溶接後の浸透探傷検査や耐圧検査等を実施して いる.また、すべての配管の下部にはLi漏洩検出器を取り 付けて早期に漏洩が検出できるようにしている.仮に漏洩 した場合の対策として、配管や機器類が設置している床に は5m²未満ごとに5cm高さの柵で区画化し、その枠から 外にリチウムが流れないようにドレン配管を設け、所定の 場所に収納できるようにしている.さらにLi火災用の消火 材の試験も実施し、消火に適合する消火剤としてナトレッ クスLが予備試験の結果により選定され、一定間隔で配備 している[49].

3.2 ELTL の総合機能性確証試験

ELTLの総合機能性確認試験ではベーキング,25トンの Liインゴットの充填,系統内へのLiチャージ・ドレン試 験,Li循環試験(最大約3000リットル/分まで)を実施し た後に背面壁に安定した高速のLi流を流すことに成功した



735 L/min(5 m/s) 流動停止時 (0 m/s) 図9 Li ターゲット流動試験.

(図9). なお、ここで使用したLi(表4)は中国のガン フィングリチウム株式会社からを購入し、不活性雰囲気の グローボックス中で 1,608 個の Li インゴット(1 個あたり 約 1.55 kg) を ELTL への投入した. 図 9 左図は, Li 流を約 523 K において、5メートル/秒の高速条件で試験部に流 した様子を示す. Li は上から下へと流れている. この時の Li 流の幅は約100mm であり、その流れの厚さは IFMIF の実機と同じ約25mmとなっていて、Liループでは毎分約 735リットルの条件でLiを循環させた条件となっている. また, 左側に3つの白い塊が見えるがこれは, Li 流を観察 するための照明が光って見えるものである. 図9右図はLi 流を止めた場合の試験部の様子を示す. 図9 左図からわか るように、光の反射の具合のために、やや凹凸感が見られ るものの、リチウムの流れは非常に安定していることがわ かった.これは、図6と図7で示した背面壁やノズルなど の製作工程に置いて高精度な加工が施すことができ,ま た、溶接等の過程においても生じる歪みが小さかったこと を示している.このように流動特性を評価する上で最大の 課題を見事クリアして、試験部のLiの流動に関する機能性 確証試験に成功した[50,51].

一方, Li ターゲットの流動特性の計測や評価についてこ れまでいろいろな評価が大阪大学のLiループ実施で行われ てきた[32,52-56].これらの解析と評価法の検討におい て,最近進展があり,Li流の解析評価から海洋波などの不 規則波群理論の適応が可能であることを明らかにされた (図10).この論文[55]は、2010(平成22)年9月にポルトガ ルのポルト市で開催された第26回核融合技術シンポジウム において高い評価を受けるなど、今後の詳細な実証試験を 進めていく上できわめて重要な指針になっていくことが期 待されている.さらに、数値流体力学における評価を進め、 ターゲット部に流れる前の部分である整流器からノズル出 口までのLi流の安定性に関する速度依存性などを現在、調 べているところである.流速の増加に伴って流体の流れの

元素	Na	Κ	Са	Fe	Si	Cl	Ν
要求值	<100	< 300	<150	<100	<100	<75	< 300
分析值	43	10	50	63	10	50	127 (90-100) *

表4 ELTL 用リチウムインゴットの不純物の分析値 (wppm).

*提供会社の分析値 125 wppm に対して, ELTL 投入後にサンプリングした Li を分析結果は90-100 wppm.



図10 Li 噴流のデータ解析法の開発.

乱れが徐々に発生する傾向になり、20m/sでは乱流強度が 大きくなることが明らかになりつつあり, IFMIF に最適な 流速条件の評価を行っている最中である. なお, ELTL は 総合機能性確証試験を実施した直後、東日本大震災により 被災し、その後に復旧作業を進めてきた。9月中旬から開 始する運転に向けて,震災前に試運転として実施した機能 性試験を実施しただけでなく、さらにステップアップさせ た機能性試験も併せて実施し、本装置の主要な目標の1 つ,標的部での流動試験として15m/sまでの流動性能試験 を2012年7月に成功させたばかりである.この試験に際し ては、まず、ターゲット部でLi 流動の初期試験として Ar 雰囲気下(0.12 MPa)で徐々に流速を上げていき,目標と する 15 m/s でリチウム流の流動試験 (523 K) を実施した. その後に負圧条件で各径路の流動状況等を調べ、安全性を 確認してから負圧下(75 Pa)で15 m/s までの流動試験を 実施し,見事にこれを成功させて,安定した Li 流の様子を 高速度カメラなどによって撮影した. これは実施機関であ る日本側が主担当として任されているターゲット施設の工 学実証試験の中で最重要なマイルストーンに位置付けられ ているものである. また, 2012年7月末の段階では, 自由 表面を持つターゲット部での流動時間については1週間程 度までの試験を実施した.また,標的部にLiを流動させな い場合の主循環系ループでの運転時間の総時間は1,000時 間を超えたところである.そして、装置の補修期間を挟ん で、9月中旬以降から本格化運転に移ったところである. 今後は次のようなステップを踏んだ評価を2014年3月末ま で進め、2014年6月までに実証試験の報告書を纏める予定 である.報告書の完成後も,ELTLにおいては以下の実証 試験が可能な設備であることから、各種工学実証試験の課 題を1つ1つ進め, IFMIFの実現に向けてこれまで以上に 貢献していくことができればよりよいと考えている.

ELTL の実証試験項目:

- (1) 523 K での比較的に高い真空度(10⁻⁴~10⁻⁵ Pa)の達成
- (2)昇温時のターゲットアセンブリの熱膨張と変位量の 測定
- (3) 電磁流量計の校正(主循環系 Li チャージ状態含む)
- (4) ターゲット部近傍におけるリチウム蒸発量の計測
- (5)ターゲットでの流動性能評価(正圧下と負圧下で最 大流速 20 m/s 試験)
- (6) ターゲットでの流動性能評価(低真空下(-100 kPaG)での試験)
- (7) ターゲットでの流動性能評価(IFMIF 運転条件である高真空(10⁻³ Pa)での試験)
- (8) ターゲット部での流況観察(高速度カメラによる撮影,ステレオ観察)
- (9)ターゲット部での流況試験(レーザー表面計測による非接触型計測法の適用試験と計測試験)
- (10) ターゲット部での流況試験(触針計表面計測による 接触型計測法の計測試験)
- (11) 主循環系ループでの数千時間の流動試験
- (12) 純化系ループにおけるコールドトラップの機能性試験(主に酸素除去)

- (13) 定期的な Li サンプリングによる Li の化学分析に Li 状態監視
- (14) 抵抗計やキャビテーションセンサーの設置(欧州の 機器を設置)
- (15) 純度監視試験(抵抗計による純度監視試験)
- (16) 流況計測試験(キャビテーションセンサーによる評価)
- (17) 実機 IFMIF のための最適なメンテナンス方法の検討 と評価
- (18) その他
- 4. 純化系システムを含む補機等の関連技術開発

IFMIF実機のLiループに生成される,対策を取るべき主 な不純物は、プロチウム、D、トリチウム(T)、ベリリウム 7 (⁷Be),炭素,窒素,酸素,および腐食生成物である.T と⁷Beは入射重水素とLiとの直接の核反応で生成され る.入射ビームであるDもその多くがLi中に取り込まれ る.1年間のフルオペレーションで H, D, Tの生成量はそ れぞれ、5g/年、160g/年、7g/年となる見込みである.こ れらの不純物は、放射能の低減や安定な流動状態にするた めにコントロールする必要がある.まず,水素同位体に対 してはイットリウム(Y)系材料で製作する水素トラップ (約 558 K で稼働)や、ステンレス鋼で製作するコールドト ラップ (473 K 付近で稼働) [54] で除去する. また, ⁷Be, 酸 素、炭素は、高速炉で開発が進み、使用実績があるコール ドトラップで除去するが、窒素の場合、Li中で溶解度が高 いため、コールドトラップでは窒素を十分に除去できない ため、別のトラップシステム開発が必要になる. 窒素用ト ラップ方式の基本的な考えは4.1節で示すが、鉄(Fe)-チタ ン(Ti)系合金で製作した窒素ホットトラップ(約673℃~ 873℃) で除去することが考えられていて, 他のシステムに 比べて使用温度が高いため、これを長時間使用するために はクリープ強度などを考慮して機器配管設計を進める必要 がある.また,Li中の水素をさらに効率的に除去するため に、水素トラップ専用装置を新しく開発を進めていて、こ れについての詳細は4.2節で説明する.そして,Li中の水素 濃度を計測するために,新たな水素検出器の開発を進めた ので、それを4.3節に纏めた.なお、Li標的の設計要求とし てこれらの不純物濃度は以下の数値を満足するようにト ラップ装置により制御する.水素同位体の場合は10 wppm 以下にし, 且つTは1wppm以下に制御する. また, 炭素, N,酸素およびBeはそれぞれ10wppm以下に制御する.Li 中で生成される放射性物質のTと⁷BeについてはKITの Simakov らによって評価され、それぞれ6g/fpy (fpy: full time operation per year, ただし, IFMIF 全体の年間の運転 稼働率は70%としている)と 1.5 g/fpy となっている[57]. また、放射化の半減期計算の結果から、もし、不純物除去 をしなければ、平衡状態での⁷BeとTはLiが1kgあたりそ れぞれ0.3 mgと50 mgとなり, それぞれ4×10¹¹ Bgと 2×10¹³ Bq の値となる. なお,液体金属中に含まれる元素 の中で,特に,炭素,酸素,窒素,および水素は材料の腐 食挙動並びに、液体金属脆化(Liquid Metal Embrittlement: LME)に影響を及ぼす元素としてよく知られている[58,59].

リチウム中窒素は Li-Cr-N 系の複合窒化物の生成などを 通してステンレス鋼などの構造材腐食を促進するほか,水 素トラップである Y の表面を汚染し,水素同位体回収の阻 害要因として機能するため低減が必要である.しかし窒素 は Li 中への溶解性が高いため,酸素や炭素のようにコール ドトラップ法により除去できず,化学的な手法による回収 が必要となる.Ti は窒化物が非常に安定であり,低窒素濃 度環境まで使用できるが,実際にTi板を用いて行った窒素 回収試験ではごく表面しか窒素と反応しなかった.そのた め窒素の拡散性の高い Fe を Ti と合金化させた Fe-Ti 合金 が着目され,合金板を用いて研究が行われてきた[60].

ELTLでは実用的観点からガス噴霧法により作製された 合金粒(0.2 mmφ)が使用される.ほぼ同等の合金粒を用い てLiから窒素回収した結果を従来の結果[61]と併せて図11 に示す.従来研究とは合金形状・合金面積/Li体積比,静 置・撹拌状態などが異なっているが,合金粒を用いた静 置・撹拌状態の比較試験では有意な差が見られなかったた め,合金形状に因る吸収特性の違いが大きいと考えてい る.

さらにN濃度低下の漸近値と合金中に取り込まれた窒素 の量を比較すると、図12に示す関係が認められた[62].こ れより合金とLi間に窒素の平衡分配が成立していることが わかる.Fe-5 at%Ti 合金ではほぼα鉄の単相状態であるの



図11 Fe-Ti 合金による Li 中 N の回収.





表5 Fe-Ti 合金粒の窒素平衡・拡散挙動.

	平均濃度[wppm] (@N/Ti=1)	窒素拡散係数 [m ² /s]
Fe-5Ti	1200	5×10^{-15}
Fe-10Ti	150	1.2×10^{-16}

に対し, Fe-10 at%Ti 合金では Fe₂Ti 相が析出するため, こ の相のN吸収への寄与が特性差をもたらしていると考えら れる.なお,二相状態図によると Fe-5 at%Ti 合金も相分離 する組成であるが,合金は溶融状態から急冷成形されるた め過飽和状態で固溶している.

合金表面でのN平衡分配と合金内部での窒素拡散から窒 素吸収挙動をモデル化すると各合金粒で表5の特性が算出 された.Fe-10 at%Ti 合金では低窒素濃度側に出る一方で, Fe₂Ti 相の析出による粒の微細化が見かけの拡散係数を低 下させていることがわかる.

現在は熱処理(結晶粒の粗大化)によるN回収性の向上 や長期的回収特性についての研究を継続して進めている.

4.2 水素トラップ

本研究開発の内容は IFMIF/EVEDA 事業のターゲット 施設における純化系実証試験タスクの一部を成すものであ る[30,46,47]. Y ホットトラップを有する小型 Li 流動装置 の設計と運転を念頭に置き, Li ループ純化系を模擬する Y ホットトラップの特性評価を行うことにより, Li ループ用 純化系システム開発に資することを目的とする.実施した 研究の具体的内容は,次のとおりである.

- Li静止系でのごく低濃度TのYによる回収効果を確認 する.
- (2)連続的に外部から供給された水素(H)同位体が、Li 流動状態にあるLi層を通り、最終的にYゲッターに吸 収除去される過程を実験的に検証し、定量的に整理式 で整理する。
- (3) 上記実験結果を用いて, IFMIF流動ループ中のTを連続回収するための装置を設計する.

これまでに行ってきた成果を以下に説明する.

 4.2.1 フッ化水素(HF)処理Yによる静的状態のLiからの T回収

実際に対象とするトラップ条件に基づき,最終的に Y 粒子充填層がTで1wppm以下,水素同位体濃度で 10wppm以下まで回収可能なことを実証することが本研 究の目的である.この研究を始めるまでは,Li-H系の水素 同位体溶解吸収平衡線(Sieverts定数KLi-H),Y-H系の水素 同位体吸収平衡線を外挿して交わった交点から,573 K付 近でLiとYを接触させると,理論的にLi流に1wppm 程度溶けた水素同位体を回収できることが知られていた [63].しかしながら,1wppmのTを溶解するLiのT平衡 分圧は573 Kで10⁻⁸ Paと低くなり,不純物の影響も受け る.またY粒子表面には通常酸化物が形成して内部へのH 拡散侵入を阻止し,十分なHの溶解回収ができなかった [64].そこで我々は,Y表面を薄くHF処理する技術を採用 し,実際に本処理後のYが直接金属接触することを化学分 析で明らかにした[65].反応は次式で表せる.

$Y_2O_3+6HF=2YF_3+3H_2O$

HF 処理後の Y を直接 Li と接触させると, 表面に形成し た多孔質 YF3 層が液体 Li に溶解し、金属 Y と Li との直接 接触が可能となる.この技術を取り入れて、中性子照射後 のLi 中に 0.07 ppm 生成させた T を HF 処理した Y と接触 させ、図13に見るように、ある接触時間内で50%程度のT を回収することに成功した[66]. さらに、Li中の初期D 濃度 LiD_{0.01} 程度のものに HF 処理した Y を接触させ, 温度 と時間を変え、LiからYへのD移行率を測定した.この場 合,接触回収後のLi中のD濃度は,まず水溶解法,Y中の DはHNO3溶解法でArパージガス中にDを取り出して質 量分析器でD濃度を測定した[67].気流中にHDO水蒸気 成分が混じると質量分析器の性能が落ちるので、マグネシ ウム還元法で HDO を HD に還元して全量を積分してから 分配係数Kとして求めた.この結果,10 wtppm溶解残留し たLi中のDを直接測定することに成功した.水素溶解量が 少ないとき, Li と Y とも Sieverts 則に従うので, それぞれ の Sieverts 係数を KD-Li, KD-Y とすると次式で表せる.

$$K\left(\equiv \frac{D/Li}{D/Y}\right) \equiv \frac{K_{\rm D-Li}}{K_{\rm D-Y}}$$

この関係が図14の実線で表されている.その結果,縦軸の 分配係数値は0.01程度となり、初期のLiから99%のDを Y側に取り出したことになる.D拡散時間を十分に取るか、



図13 HF 処理した Y と中性子照射した Li を接触させたときの Li から Y への T 回収率の温度変化[7].



図14 LiからY層へのDの分配率の測定結果[11].

流動により拡散距離を短くすると回収率が実線で示した理 論効率に近づくことが予想される.

Liループ運転時にもループから適当な時間間隔でサンプ リングをし、本装置の溶解法を用いることにより、定量測 定が可能であることがわかった.

4.2.2 流動状態の Li から Y による水素同位体の回収

小型Li撹拌流動装置内に置かれたモリブデンるつぼにY 粒子あるいはY板と十分な量のLiを装填し,一定温度で撹 拌した[9,10].空気等との不純物接触を避けるため全体を Ar 製グローブボックス内に入れ,撹拌装置上部より,Ar ガスで希釈した H₂あるいは D₂を含む混合ガスを供給 し,Li層からLi-Y界面を通ってY層内に至る過程の総括吸 収速度を実験的に求め,IFMIF/EVEDAで実証が必要なY ホットトラップ性能の評価試験を行った.実験前にY試料 にフッ酸処理(HF処理)を行っている.ある瞬間の水素吸 収率 j_{H2}(mol/m²s)は、ガス側の濃度変化とガス流量から 求めるとともに、Li側あるいはY側の積分吸収量は、4.2.1 節で記載した H₂O あるいは HNO₃ 溶解法で求めた.単位面 積あたりの水素吸収率 j_{H2} は化学工学の手法でよく用いら れる物質移動係数 k_{H2} を用いて次式で整理した.

$$j_{n_2} = k_{H_2} \{ c_{H_2} - c_{S,H_2} (q_H) \} = k_{H_2} \{ y_{H_2} - y_{H_2} (q_H) \}$$

ここで、C_{H2} はバルク気体中の H 濃度 (mol/m³)、C_{SH2}は Y に溶解している H の濃度 q_H と平衡にある気体 H 濃度 (mol /m³)である.このとき k_{H2} は m/s の単位である.H 濃度を 気流中の水素モル分率 y_{H2} で表すと、k_{H2}'は mol/m²sの単位 となる.図15は、この k_{H2} をいくつかの H 濃度、回転数で 求めて整理した結果であり、回転数にも、H 濃度にも依ら ない結果となった.流速と H 濃度に依存せず、一定の物質 移動係数の値が得られたことは、物質移動の律速段階が Li から Y への吸収反応移行速度あるいは Y 内の拡散であるこ とを示している.また温度を上昇させると k_{H2} は上昇した. さらに水素同位体の総括吸収過程を数値計算し、計算モデ ルと実験結果との比較より内部で起こる過程を具体的に明 らかにした[68-70].いずれにしても、求めた値が IFMIF 運転条件の 573 K での Y トラップ内の水素吸収速度の予測



図15 水素吸収物質移動係数のH濃度依存性と回転数依存性 [10].

Commentary

に使えることが判明し、これを使って Y トラップの設計作 業が行われた[71].

4.2.3 Yトラップの設計

本研究で明らかにする項目は、Li流動ループに組み込ま れたYトラップが、公衆安全のためIFMIF-Liループ運転中 に発生するTを1wppm以下に、全水素同位体濃度で 10wppm以下にできるかどうかを実験的に検証すること にある.現在製作した小型Li流動装置を使い、H・Dの回 収実験を行っている.現在までの成果を用い、IFMIFにお けるLi流動ループからT等の水素同位体を回収するYホッ トトラップの設計を行った.設計条件は、T発生率が7g /年、全水素同位体発生率が170g/年である.求められた値 は、表6にまとめている[70].Yトラップの全体像は、過 去の文献に示している[71].今後も引き続いて、実験を継 続し、より広い領域で実験を遂行し、IFMIF/EVEDAの成 功に導きたいと考えている.

4.2.4 Yトラップ開発の纏め

IFMIF/EVEDA 事業内の純化系システム開発の1つの テーマとして、T回収用のYトラップの開発のため、Y トラップにおけるHやTの移動過程の基礎研究を行った. HF処理がY吸収速度増加に有効であること、またこれが 流動条件でも耐えうることがわかった.1wppm以下のT がYにより回収できる見通しがあること、流動条件でH

H hot trap	Design value
体積	26 L
殻部の材料	SUS 304 鋼
殻内部のトラップ	Y 粒子
粒子の直径	0.8 mm – 1.3 mm
トラップ材の重量	25 kg
吸収温度	573 – 623 K
フィルターサイズ	200 mesh (0.077 mm)
Li流量率	10 L/min
流れ方向	底から上部へ

表6 Yトラップ設計値.

 濃度に依らず,流動状態にも依らず H 回収率を求めること ができた.このようにして求めた水素同位体の物質移動係 数を使って Y トラップの設計に適用した.

4.3 Li 用水素同位体濃度センサーの開発

4.2項のとおり,Li中の水素同位体は除去が必要となる が,その運転監視のためには水素同位体センサーが必要と なる.濃度測定手法としては化学的なものをはじめとして いくつか考えられるが,連続的且つオンラインで測定でき る手法はIFMIFのみならず液体Liブランケットシステム などにおいても重要である.そこでこの条件を満足する, 金属透過壁を利用した水素同位体濃度センサーの開発を実 施してきた.

Li 用水素同位体濃度センサーの概略図を図16に示す. H および D は高真空排気下での圧力変化や質量分析計によ り, T は He ガススイープ下で電離箱を用いて測定した.水 素同位体を透過させる金属壁の材料は,透過係数(水素の 溶解度と拡散係数の積)の観点からは溶解度に優れる Ti, ジルコニウム(Zr),ニオブ(Nb)などが原理的には良好 であるが,これらの材料は熱力学的に酸化物が非常に安定 であり,さらに窒化物が Li 中でも安定に存在しやすく,表 面反応相の存在により透過性が変動する懸念がある.一 方, Fe は水素溶解度が高くないため透過係数自体は低めで



図16 水素同位体濃度測定系の概略.



あるが,Li 側表面に化合物が存在することはなく,また酸 化物は比較的還元しやすいため,表面状態を維持しやすい と考えこれを採用した.

Li中の水素同位体濃度をガス吸収(H,D)および中性子照 射(T)により変化させ、透過した各同位体量を測定した結 果を図17-19に示す.H[72]およびD[73]はIFMIFターゲッ ト系での想定よりも高濃度領域であるが、濃度に対して直 線的に透過量が増大することがわかる.T[74]は想定より も低濃度領域であるが、定量可能な量で透過することが確 認されている.またこの体系を利用し873KにおいてY による水素回収のその場観察試験・YのN汚染影響の評価 なども実施した[72].

前述のとおり, Feは耐劣化性に優れるものの水素の透過 性は高くない物質であるため, 透過性の高いTiの表面に鉄 を保護層としてコーティングすることで, 透過性と耐劣化 性を兼ね備えた複合透過センサーの開発にも取り組んでい る. Fe 層の存在により非汚染環境での透過性自体は純 Ti の場合よりも低下するものの, 真空側表面の耐酸化性能 や, Li 側表面の耐窒化性能が向上することが確認されてお り[75], より長時間の運転に耐える材料の組み合わせなど について研究を進めている.

5. IFMIF 建設への展望と ELTL の波及効果

現在, IFMIF/EVEDA 事業では2013年6月末までにIF-MIFのための中間工学設計書を完成させるべく,日欧実施 機関,および事業チームの協力によって工学設計が急ピッ チで進められ,様々な評価が進んでいる最中である.ま ず,2012年3月末に設計記述文章(DDD)-Iとしてそれぞ れの施設ごとの基本評価が行われ,第2ステップは2012年 9月末までにDDD-IIとして詳細な施設設計が評価された 後,2013年3月末までにそれぞれの施設の工学設計が完成 予定である.これを2013年6月末までに施設間の整合性が 十分に取れた統合設計に纏め,IFMIFの中間工学設計書が 完成する予定である.

IFMIFは,核融合炉原型炉の構造材料や機能性材料等の

材料特性の性能を明らかにして,原型炉の建設のための許 認可を得るために,原型炉材料の照射損傷データを取得す ることを主目的とした施設である.現在の所,核融合エネ ルギーの実現のための原型炉建設に関する戦略は,各種の 場で議論と検討がなされている段階であり,明確な合意に は至らず,IFMIF建設に対しても国際的な場での合意には 至っていない.したがって今後の核融合エネルギーの実用 化に向けたロードマップと技術戦略などの中で,その取り 組みと進展が期待されている.

IFMIF/EVEDA 事業では、IFMIF の中間工学設計報告 書を2013年中旬までに完成することになっているが、工学 実証試験に関してはこの後も続き、JAEA 大洗での ELTL の実証試験(2014年中旬まで)と JAEA 青森研究開発セン ターでの加速器の実証試験(2017年中旬まで)がそれぞれ 行われる.これらの研究開発成果に基づいて、最終的な工 学設計報告書が次の段階で作成される計画になっている が、EVEDA 事業後の詳細な計画はまだ議論が開始された ばかりである.日欧で検討を始めているDEMOフロンティ ア計画の一環として、ELTLをIFMIF/EVEDAで開発中の 加速器と組み合わせる予備的な検討はあるが、これはブラ ンケットのコンポーネント試験には、体積発熱が小さく、 有効な評価が難しそうである.しかし、材料照射による試 験は有益な施設となり得ることが考えられ、他の照射施設 と比べて利点評価などの検討を始めたところである.

他方で, IFMIF 用 Li 施設開発は, 他の関係分野に波及し 始めている.この理由は、Liターゲットが真空下で輸送さ れるビームを直接,液体Li流れに入射させる点に特徴があ り、核融合炉の液体ダイバータの概念と類似しているから である.昨年4月に、米国プリンストンプラズマ研究所 (PPPL)で核融合機器へのLiの適用に関する第2回国際シ ンポジウムが開催されるなどLiの応用については注目を浴 びている[76].また、Liの応用核融合炉システムに液体Li を有効的な利用を検討しているものとして、例えば、米国 ではNSTX-UプロジェクトがPPPLの小野らによって進め られている[77-79]が、NSTXのアップグレードは2011年 10月より開始され、2014年春ごろに立ちあげられる予定で ある.この先に小野らによって現在開発が進められている 核融合科学施設 (FNSF) があり、 プラズマにより高強度の 中性子を生成させ、ブランケットの試験を実施する計画が ある.そしてさらに球状トカマクによる発電試験へと向か うことが計画されている.NSTX 中のLiはHモードプラズ マにとって大変力強い道具として機能を持つことがわかっ ている. 図20に液体Liを利用したLiダイバータの概念図を 示す. Liをトロイダル方向に均一になる程度に流し、プラ ズマまわりのDや不純物を吸ってプラズマ閉じ込め性能を 20~30%程度の効率を向上されることや、ダイバータ部で は流入してくるプラズマのLiイオンによる放射冷却によ り、ダイバータ板への熱フラックスをかなり減少させるこ とができる. IFMIF 開発で実施しているLiターゲットの研 究開発の内容は、液体ダイバータ等にも共通となる技術が あり,諸外国の関係機関からも非常に注目されている. さ らには、 癌治療などを目的とした加速器 BNCT (ボロン中



図20 液体 Li ダイバータの概念図.

性子捕捉療法)照射施設等の開発中の医療施設と共通とな る部分があり,昨年11月にJAEA 青森研究開発センターで 実施したIFMIF研究会でLi標的のテーマに関しても, BNCT研究をしている東京工業大学や京都大学の専門家を 交えて幅広い議論を行った.これに関係している東京工業 大学の原子炉研究所で,昨年3月からプロトタイプ装置の 設計製作を開始し,実用的な運転条件(液体Li温度493 ~523 K,雰囲気圧力10⁻³ Pa以下)において,膜厚0.6 mm, 流速毎秒 30 mのLi液膜流を,曲率半径10 cmの湾曲板上 に幅50 mm×長さ50 mmの領域に安定形成することに本 年2月に成功している.

このように IFMIF の研究開発技術は他の研究施設開発 へ大きな波及効果を示しており,今後相互にそれぞれの開 発が進んでいくことが大変期待されている.

6. まとめ

IFMIF/EVEDA 事業では、IFMIF 建設に向けて工学実 証試験と工学設計活動を2007年より進めている.日欧の実 施機関と事業チームの調整の下で日欧実施機関が協力し, 数々の技術課題に取り組んでいる.この中でLiターゲット (標的)施設の研究開発は実施機関として2010年度に世界 最大の液体Li試験ループを完成させ,ターゲット部となる Liの自由表面の流動安定性試験等の第一段階実証試験を成 功させたところである.IFMIFの安定運転のために必要な 純化系システム開発を主に共同研究の中で実施してきた. 建設したLi標的施設での成果が出てきているところであ り,関係する分野へもその技術が波及し始めている.今後 も,さらなる活動成果の蓄積を進め,日欧協力事業の実が 結び,さらなる展開が進んでいくよう,努力を続けていき たい.

参考文献

- [1] M. Enoeda et al., Nucl. Fusion 43, 1837 (2003).
- [2] T. Hirose et al., J. Nucl. Mater. 417, 108 (2011).
- [3] N. Okubo et al., J. Nucl. Mater. 417, 112 (2011).
- [4] K. Shiba et al., J. Nucl. Mater. 283-287, 358 (2000).
- [5] R.L. Klueh *et al.*, J. Nucl. Mater. **307**, 455 (2002).
- [6] A. Hasegawa et al., J. Nucl. Mater. 386, 241 (2009).
- [7] H. Tanigawa et al., J. Nucl. Mater. 417, 9 (2011).
- [8] Y. Miwa et al., J. Nucl. Mater. 329-333, 1098 (2004).
- [9] N. Hashimoto et al., J. Nucl. Mater. 305, 53 (2002).
- [10] E. Wakai et al., J. Nucl. Mater. 283-287, 799 (2000).
- [11] E. Wakai et al., J. Nucl. Mater. 307-311, 278 (2002).
- [12] E. Wakai et al., J. Nucl. Mater. 318, 267 (2003).
- [13] E. Wakai et al., J. Nucl. Mater 343, 285 (2005).
- [14] E. Wakai et al., J. Nucl. Mater. 356, 95 (2006).
- [15] T. Tanaka et al., J. Nucl. Mater. 329-333, 294 (2004).
- [16] T. Taguchi et al., J. Nucl. Mater. 335, 508 (2004).
- [17] T. Sawai et al., J. Nucl. Mater. 307-311, 312 (2002).
- [18] M. Ando et al., J. Nucl. Mater. 329-333, 1137 (2004).
- [19] 日本原子力研究開発機構:未来を拓く原子力-原子力機 構の研究開発成果-(2006).
- [20] IFMIF International Team, IFMIF Comprehensive Design Report, IEA (2004).
- [21] 松井秀樹他:プラズマ・核融合学会誌 82,3 (2006).
- [22] 木村晴行他:プラズマ・核融合学会誌 86,223 (2010).
- [23] T. Nishitani et al., Fusion Eng. Des. (2012), in press.
- [24] A. Mosnier, U. Ratzinger, Fusion Eng. Des. 83, 1001 (2008).
- [25] M. Sugimoto et al., J. Nucl. Mater. 329-333, 198 (2004).
- [26] M. Sugimoto et al., J. Nucl. Mater. 307-311, 1691 (2004).
- [27] H. Shidara et al., Fusion Eng. Des. 86, 2674 (2011).
- [28] P. Garin et al., Fusion Eng. Des. 84, 259 (2009).
- [29] P. Garin et al., J. Nucl. Mater. 417, 1262 (2011).
- [30] K. Nakamura *et al.*, Fusion Eng. Des. **86**, 2491 (2011).
- [31] H. Nakamura et al., Fusion Eng. Des. 83, 1007 (2008).
- [32] H. Horiike et al., Fusion Eng. Des. 66-68, 199 (2003).
- [33] K. Watanabe et al., Fusion Eng. Des. 86, 2482 (2011).
- [34] F. Arbeiter *et al.*, Fusion Eng. Des. **86**, 607 (2011).
- [35] D. Leichtle et al., J. Nucl. Mater. 386-388, 954 (2009).
- [36] A. Moeslang et al., Fusion Eng. Des. 81, 863 (2006).
- [37] E. Wakai et al., Fusion Eng. Des. 86, 712 (2011).
- [38] T. Kogawara et al., Fusion Eng. Des. 86, 2904 (2011).
- [39] J. Molla et al., Fusion Eng. Des. 86, 2522 (2011).
- [40] P. Garin, et al., Fusion Eng. Des. 86, 611 (2011).
- [41] Y. Ikeda, J. Nucl. Mater. 343, 7 (2005).
- [42] J.R. Haines et al., J. Nucl. Mater. 343, 58 (2005).
- [43] W. Wagner et al., J. Nucl. Mater. 377, 12 (2008).
- [44] M. Ida et al., JAERI-Tech 97-030, March 1997.
- [45] M. Ida et al., Fusion Eng. Des. 70, 95 (2004).
- [46] H. Kondo et al., Fusion Eng. Des. 86, 2437 (2011).
- [47] H. Kondo et al., Nucl. Fusion 51, 123008 (2011).
- [48] H. Kondo et al., Fusion Eng. Des. (2012), in press.
- [49] T. Furukawa et al., Fusion Eng. Des. 86 2433 (2011).
- [50] H. Kondo *et al.*, *presented in* Fusion Energy Conference of IAEA 2012.
- [51] H. Kondo et al., to be applied in Nucl. Fusion.
- [52] H. Kondo et al., Fusion Eng. Des. 81, 687 (2006).
- [53] T. Kanemura et al., Fusion Eng. Des. 82, 2550 (2007).
- [54] H. Kondo *et al.*, Fusion Eng. Des. **82**, 2483 (2007).
- [55] H. Kondo, Fusion Eng. Des. 85, 1102 (2010).

- [56] T. Kanemura et al., Fusion Eng. Des. 86, 2462 (2011).
- [57] S.P. Simakov et al., J. Nucl. Mater. 329-333, 213 (2004).
- [58] P. Hubberstey, Proc. 3rd. Internat. Conf. on Liquid Metal Engineering and Technology in Energy Production, Vol.2, Oxford, 85-92 (1984).
- [59] K. Natesan, J. Nucl. Mater. 115, 215 (1983).
- [60] S. Hirakane et al., Fusion Eng. Des. 75, 721 (2005).
- [61] S. Hirakane et al., Fusion Eng. Des. 81, 665 (2006).
- [62] 八木重郎他: 2012原子力学会春の年会 A19.
- [63] H. Nakamura et al., Fusion Sci. Technol. 41, 845 (2002).
- [64] J. B. Talbot, P. W. Fisher, S. D. Clinton, J. Nucl. Mater. 103, 681 (1981).
- [65] Y. Wu et al., Fusion Eng. Des. 85, 1484 (2010).
- [66] S. Fukada et al., Fusion Eng. Des. 82, 2152 (2007).
- [67] S. Shigeharu et al., Proc. 21st International Toki Conference

(2011) Toki.

- [68] K. Katekari et al., J. Energy Power Eng. 6, 900 (2012).
- [69] Y. Hatachi et al., Fusion Eng. Des. 87 (2011), in press.
- [70] S. Fukada et al., Fusion. Sci. Technol. 61, 58 (2012).
- [71] S. Fukada et al., Proc. 3rd IFMIF workshop, Madrid, Spain, (2010) Sep. 22.
- [72] J. Yagi et al., J. Nucl. Mater. 417, 710 (2011)
- [73] J. Yagi et al., Fusion Eng. Des. 84, 1993 (2009).
- [74] J. Yagi, A. Suzuki and T. Terai, Fusion Sci. Tech. 60, 1014 (2011)
- [75] J. Yagi et al., Fusion Sci. Tech. for ICFRM-15, in press.
- [76] M. Ono, Fusion Eng. Des. (2012), in press.
- [77] M. Ono et al., Fusion Eng. Des. (2012), in press.
- [78] M. Ono, et al., Fusion Eng. Des. 85, 882 (2010).
- [79] H.W. Kugel et al., Fusion Eng. Des. (2012), in press.



若井栄一

日本原子力研究開発機構の核融合研究開発部 門に所属. IFMIF 照射・試験施設開発グルー プリーダー.主な研究分野は,原子力材料全

般,材料照射損傷学,透過型電子顕微鏡,微小試験片試験技術 と装置開発など,最近では IFMIF 開発に従事.日々悪戦苦闘 中ですが,周りの皆さんのサポートも含め,日欧連携機関の皆 様に感謝の連続.NASA を超えるような世界一の研究機関を 作るにはどうすれば良いか?.趣味は家族と過ごすこと,テニ スなど.100年後の世界を見ることができたら,さぞかし素晴 らしいと思っている.



智 深田

九州大学大学院総合理工学研究院エネルギー 理工学部門に所属.主な研究分野は,エネル ギー化学工学で,特に核融合におけるトリチ

ウムを含む水素同位体の回収,閉じ込め等の操作を検討して います.エネルギーの将来は本当に明るいのでしょうか.



* ぎ じゅう ろう 八木重郎

所属:核融合科学研究所, ヘリカル研究部.研 究分野:リチウム等の液体ブランケット関係 の材料研究.その他:東大を離れ4月より核

融合研でお世話になっております. これまではほとんどリチ ウムが対象でしたが,現在は溶融塩含めていろいろ研究を広 げさせていただいております.



かね むら たく じ金材 卓治

日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部 門 IFMIF 照射・試験施設開発グループ.専 門分野:計測技術開発(特に液体金属の自由

表面流れに関する計測)および液体金属利用技術開発.



i 川智弘

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発セン ター 技術開発部 研究副主幹.専門分野:

ナトリウム,鉛ビスマスおよび超臨界 CO 2 等 の高速炉冷却材中における構造材の腐食評価ならびに液体金 属利用技術開発(リチウム含む).



日本原子力研究開発機構 大洗研究開発セン ター 技術開発部 液体金属試験技術課.液 体リチウム試験ループ(ELTL)の建設・運転



藤城興司

日本原子力研究開発機構.主な研究分野:計 算流体力学.趣味:登山 最近は専ら妻を連 れて茨城の低山に分け入ることが多いです.



が き あき ひろ 鈴木 晶大

東京大学大学院工学系研究科原子力専攻,准 教授.核融合科学研究所を経て,現職.主な研 究分野:核融合炉・次世代原子炉や水素エネ

ルギーなどの将来エネルギーの要素技術となる, 薄膜, 液体金 属, 溶融塩, 電解質などについての実験的研究をしています.



寺井隆幸

東京大学大学院工学系研究科教授(総合研究 機構長). 神戸市出身. 東京大学大学院工学系 研究科博士課程修了後,日本学術振興会奨励

研究員,東京大学工学部助手,同助教授を経て,平成11年より 現職. 原子力国際専攻および工学部システム創成学科を兼 担.専門分野は環境エネルギー材料科学.主な研究テーマ は,原子力・核融合炉材料化学,水素エネルギーシステムの要 素技術研究,高エネルギー粒子プロセシングなど.趣味は旅行 と写真. 研究室ホームページ (http://lohas.t.u-tokvo.ac.ip/ public/bbs/bbs.cgi) に教育研究関係の写真を多数掲載.



枝尾祐希

2012年九州大学大学院総合理工学府博士後期 課程修了.博士(工学).現在,日本原子力研 究開発機構,核融合研究開発部門,ブランケッ ト研究開発ユニット、トリチウム工学研究グループに所属.博

士研究員, 主な研究分野は, 核融合炉トリチウム工学, 現在は 核融合炉からのトリチウム回収に関する実験と解析に携わっ ています.



商本鉄史

九州大学大学院総合理工学府先端エネルギー 理工学専攻に所属.現在はYを用いた液体Li からの水素同位体回収について研究を行って います.以前は機械工学について学んでいましたが、エネル ギーに関して興味を持って現在の研究を始めました.



しげ はる 諭志

九州大学大学院総合理工学府先端エネルギー 理工学専攻修士課程.液体リチウムにおける 水素同位体回収に関する研究をおこなってい

る. 機械専攻で培った技術を活かし実験に全力で取り組んで いる.

сл 近	どう藤	ひろ	*夫
すぎ杉	もと本	まさ日日	よし義
,并	だ田	みず	*穂
かた渡	^{xベ} 辺	かず	い慶
にい新	っま妻	しげ 重	گ
い堀	いけ池		DSL 寛



き むら はる ゆき

日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部 門 核融合プラズマ理工学.昨年3月に原子

力機構を定年退職し,現在は嘱託 (IFMIF ターゲット系総括コーディネータ)です。筋力トレーニングで 体力の向上に努めています.



ひさし せり ざわ

1997年東京大学大学院 工学系研究科 材料学 専攻 博士課程修了, 大阪大学 接合科学研究 所 数理解析学分野 准教授. 溶接·接合継手

の変形・残留応力および強度特性に関する研究. 大学時代は スキーに熱中するも、ここ十数年、雪上にたたず、8歳と5歳 の娘二人と戯れる毎日です.



義之 让

名古屋大学大学院工学研究科エネルギー理工 学専攻 教授. 主な研究分野 流体乱流, 非線 形現象. 1993年名古屋大学大学院博士後期課

程修了,博士(工学),名古屋大学助手,准教授を経て2010年 より現職.趣味は読書、学生と議論すること.家族は妻と息子 の三人家族.春先に咲く花が好きで、先日、クロッカス、ムス カリ,水仙,ヒヤシンス,チューリップの球根を植えました.



武尾文雄

八戸工業高等專門学校 機械工学科 学科 長·教授. 1984年東北大学工学部機械工学科 卒業,博士(工学),青森県八戸市出身.材料

力学,材料強度学,三次元設計製図などの講義を担当,主な研 究分野:電気・磁気を用いた材質および欠陥の非破壊評価法 の開発.

机足英二 翁 太 幸 やま おか のぶ お山 岡 信 夫

かわ ひとょう すけ