

**核変換実験施設（TEF）
技術諮問委員会**

2016年12月12-14日
東海村

T-TAC 2016 報告書

本和訳において、【 】は訳時の追記を示す。

目次

要 旨	4
はじめに.....	5
1. J-PARC TEF 計画の概要	5
2. TEF-T 設計の詳細.....	6
2.1 ターゲットシステムと保守	6
2.2 ターゲット設計	7
2.3 ターゲットステーション	7
2.4 照射と照射後試験計画	8
2.5 多目的利用	8
2.6 施設設計	9
2.7 制御システム	10
3. TEF-T 設計のための実験と結果	10
3.1 TEF-T ターゲットモックアップループ – IMMORTAL.....	10
3.2 高温腐食試験ループ – OLLOCHI	11
3.3 酸素センサとポテンシャル制御	12
3.4 フリーズバルブ開発	13
4. 陽子ビーム輸送	14
4.1 L-TEF BT とニュートロニクス設計と研究.....	14
4.2 レーザによる TEF-P 向けビーム引き出し	14
5. 安全性	15
5.1 基本方針及び故障影響分析 (FMEA)	15
5.2 鉛ビスマス漏洩事象の解析	15
5.3 TEF-T の遮蔽設計	16
6. TEF-P の概要	16
結論	18
本報告のセクション毎の勧告のまとめ	19
Appendix I – 第 3 回 T-TAC アジェンダ	23
Appendix II – J-PARC による T-TAC 2015 の責務	25
Appendix III - 2015 年の T-TAC 委員	26

要 旨

2016年12月12-14日、東海村のJ-PARCにて核変換実験施設（TEF）計画の技術諮問委員会 T-TAC が開催され、そして LINAC 建家、SAFER 棟、高温工学特研の実験室に加え、TEF 建設予定地を視察した。T-TAC は、J-PARC スタッフによる詳細な報告により、TEF 計画の総括的な概念を与えてくれたことについて、斎藤直人 J-PARC センター長に感謝する。

廃棄物核変換を目指し JAEA が提案している加速器駆動システム（ADS）開発に向けたロードマップの一部として、TEF 計画が紹介された。「ADS ターゲット試験施設」（TEF-T）とともに、マイナーアクチノイド（MA）燃料を用いた炉物理研究を行う臨界／未臨界炉である「核変換物理実験施設」（TEF-P）について、建設に向けた R&D、設計と許認可における主要課題について、委員会の場で紹介された。これに対し T-TAC は、各項目について所見、コメント及び勧告のリストをまとめた。TEF-T と TEF-P の両システムは、世界の中でも傑出しておりユニークである。T-TAC は、適切な資源が与えられる場合には、TEF 計画は工学規模の高レベル廃棄物核変換のための ADS 開発に貢献し、また科学的、技術的及び社会的に重要な利益を創出することが出来ると確信する。

TEF-T の概念設計段階を完結させるため、T-TAC は技術設計書（TDR）ドラフト版に計装、廃棄物評価と施設解体の節を追加して完成させることを勧告する。

T-TAC は、MYRRHA 等の ADS 開発を進めている他の機関との協力と共同の教育・訓練プログラムの実施を強化するとともに、TEF における研究計画の遂行と産業への応用に向けて関連するコミュニティ（例えば核物理、宇宙核物理、核医学）に対し TEF の可能性をアピールすることを、強く奨励する。

はじめに

2016年12月12-14日、東海村のJ-PARCにて核変換実験施設（TEF）計画の技術諮問委員会 T-TAC が開催され、そして LINAC 建家、SAFER 棟、高温工学特研の実験室に加え、TEF 建設予定地を視察した。付録 I に会合のアジェンダを、付録 II に J-PARC センター長より与えられた委員会の責務を示す。参加できなかった Eric Pitcher 委員（ESS）を除き、委員会メンバー全員（付録 III）が、3 日間の会合に参加した。

本報告書に記載した所見、コメントと勧告は、発表及び会合中に T-TAC に提供された情報に基づくものである。今回の T-TAC によるレビューには、TEF-T の技術設計書（TDR）ドラフト版は考慮されていない。

1. J-PARC TEF 計画の概要

放射性廃棄物の核変換のための JAEA 提案 ADS 開発に向けたロードマップの一環として、核変換実験施設計画が紹介された。2016年4月1日時点における J-PARC の関連する研究開発セクション構成と、TEF 計画のターゲット（-T）、ビーム輸送（-BT）及び炉物理（-P）に関する最新の計画が示された。

所見とコメント

2015年の前回T-TAC以降、核変換ディビジョンにスタッフが増員されたというものの、詳細設計及び申請書類の完成と現在計画されているTEF-TとTEF-BTの建設段階への移行には、TEFチームの更なる強化及び建設チームの設立が必要であると、T-TACは評価する。

TEF建設予算獲得遅れの観点から、計画の見直しが必要であるとT-TACは考える。計画が遅れていった場合に、最終的な建設コストがどの程度変化するかを明確にすべきである。これまで、そのようなリスク分析は示されておらず、要求している人員を割り当てないことによる影響も評価されていない。

MYRRHAのようなADS計画や、関連する専門知識を有する機関（大学、研究所、産業界等）を包含した「ADS分離変換タスクフォース」を形成し、相互協力と教育・訓練プログラムを強化することを、T-TACは強く推奨する。また、研究（核物理、天体核物理、核医学等）や商業応用（半導体の試験等）を行う様々なコミュニティに対し、TEFの可能性をアピールすることも強く推奨する。

勧告

- 1.1 TEF 計画の見通しを高めるため、PR 活動を継続せよ。日本の原子力及び非原子力の企業団体に向けて計画を紹介し、他のコミュニティ（高速炉や地層処分等）の専門家への説明により計画の信憑性を維持するとともに公開討論での専門家間の衝突を回避し、一般

向け TEF 紹介のウェブサイトを再考（内容を科学的にし過ぎず、一般の関心を引く応用事例集を追加し、メディア・ギャラリーを追加するなど）せよ。

2. TEF-T 設計の詳細

2.1 ターゲットシステムと保守

T-TAC2で示された概念設計に基づき、さらにシステムを単純化するための新たな要素が導入されたターゲットシステムの新設計が示された。例えばLBEの漏洩事象に対する安全性向上のため、特にターゲット容器の設計、ターゲットループ及びターゲット台車の設計が見直された。

所見とコメント

ターゲット容器ユニットについて、基本設計は変わっていない。関連機器との接続箇所は、ターゲット容器直後に位置している。ターゲット容器内へのLBE充填に伴う撓みが最小となるよう、その支持構造が設計されている。

主要な設計変更は、ターゲット容器【の周辺雰囲気】を負圧に維持するための可動式バキュームベッセルの導入である。さらにこのバキュームベッセルは、事故時に反応生成物を封じ込めるための「セーフティハル」としても機能する。バキュームベッセルはターゲット容器設計の単純化（故障リスクの低減）のため独立した機器として設計されているとともに、ターゲット交換後の再利用性を改善するものである。ターゲット容器中心は、バキュームベッセル内の支持構造によりビーム窓中心に自動的に位置決めできる。一次LBE系はターゲット台車上に配置される。一次LBE系機器の機能試験は、IMMORTALループ（3.1項参照）で実施される。LBEの流速は1m/sに設定されているが、ADSにおいては一般的に2m/sが適用される。流速を制限する理由（材料腐食等）は示されていない。

既にT-TAC2において議論したが、継手／フランジを出来るだけ排除するため、自動切断の最新状況、配管端に固着したLBEの除去とターゲット配管の再溶接技術が示された。T91配管の再溶接については、脆化を避けるため溶接領域に対して760°Cで約2時間の焼き鈍し熱処理が不可欠である。

勧告

- 2.1.1 新ターゲット容器を再溶接する前に、ターゲット配管に固着したLBEを適切に除去する手法を実証せよ。
- 2.1.2 配管再溶接前のLBE除去の品質確認手法を開発せよ。
- 2.1.3 【溶接後の】熱処理とその後の室温への空冷を含め、これに必要な可搬式外部ヒータの可能性を追求せよ。

2.2 ターゲット設計

T-TAC2勧告への対応として、流れの安定性の向上と負荷応力レベルの低減のため、流路スリット追加と内管形状修正、翼型流れガイド、及びビーム窓形状変更による、3種のターゲット容器形状が検討されている。

所見とコメント

ターゲット容器の設計において、負荷熱応力レベル低下のため、ビーム窓中央のLBE流れのよどみ域の回避は極めて重要である。したがってビーム窓の曲率の変更は、よどみ域の体積と負荷応力レベルを有意に最小化した。陽子ビームがオフセットしても、SUS316とT91鋼の最高温度と負荷応力レベルは制限値以下に収まると思われる。ターゲット計装（振動監視、応力計測、超音波流速計、等）に関する情報は、ほとんど提供されなかった。

勧告

- 2.2.1 IMMORTALでの試験の前に、SUS316とT91鋼製の選定したターゲット設計について、その機能をフル3次元流動解析によって実証せよ。
- 2.2.2 SUS316との比較において、T91鋼の液体金属脆化のリスクを検討せよ。その結果はターゲット設計にどのような影響をもたらすであろうか？
- 2.2.3 Aタイプ、Bタイプ、Cタイプのターゲット容器が適切な結果を与えない場合、ビーム窓中央のよどみ域回避のため、ターゲット中にバイパス流れを導入し、「Bタイプ」として検討せよ。

2.3 ターゲットステーション

ターゲットシステムは、鉛ビスマス（LBE）ターゲット、真空ベッセル及びターゲット台車を含み、TEF-Tの中央に位置している。ターゲットステーションは、ターゲットシステムの他、水冷遮へい体を内包するインナーベッセル、アウターベッセルと鉄遮へい体、アウターベッセルを囲むコンクリート生体遮蔽体から構成される。4つの主要設計指針（遮へい、気密、除熱、インターフェース）について詳述され、これら指針に沿ったターゲットステーションの配置について示された。

所見とコメント

現状のターゲットステーションの設計を、設計会社の協力を得つつ「詳細設計」のレベルに向上させるために実行すべき課題がリストアップされた。

勧告

- 2.3.1 陽子ビームの分布（エネルギー密度、ビームエミッタンス他）を考慮しつつ、陽子ビーム窓の影響について評価せよ。
- 2.3.2 中性子ビームライン及び多目的利用ターゲットとの統合について検討せよ。遮蔽に与える影響はどうか？

2.4 照射と照射後試験計画

所見とコメント

TEF-T照射後の種々の試料作製手法の妥当性について評価がなされた。放電加工（EDM）、旋盤加工及び両者の組み合わせについて、それぞれの良し悪しが示された。特にDPA場（中性子対陽子）の形状とともに温度とLBE流れといった照射条件について、これらを監視し維持するための手法を明確化する必要がある。

勧告

- 2.4.1 試料周りの流れの様子を評価し、エロージョンについて確認せよ。
- 2.4.2 ターゲット設計決定の後、詳細な照射条件と照射後試験計画（ターゲット容器と試料）を定めよ。

2.5 多目的利用

ADSの研究開発に加え、TEF-Tの鉛ビスマスターゲットで発生する高速及び高エネルギー中性子を有効活用するために、ターゲット近くに「多目的」利用装置が設置される計画である。この付加的目的のために追加する設備（気送管、中性子ビームポート、ISOL施設）が示された。また、目指している研究領域が数例示された。

所見とコメント

ISOL施設は独立したビームラインであり、未だ基本設計の段階である。また、第2ターゲット台車の挿入機構が示されたが、さらなる検討が必要である。

シングルイベント効果とシングルイベントアップセットに関する試験は国際標準を遵守する必要があるため、これらの試験が民間企業の中性子源を用いて商業的に行われようとしている。【多目的利用の】応用分野を検討するにあたり、このような進展にも注視すべきである。

勧告

- 2.5.1 【中性子ビーム照射場の】空間分布の検討にあたり、ターゲット上の中性子分布を考慮すべきである。
- 2.5.2 ユーザーにとってもう一つの重要な情報として、検出場所【中性子ビーム照射場】でのエネルギースペクトルを検討せよ。
- 2.5.3 想定している研究テーマに関係する潜在利用者を集めた研究会を開催することは、彼らの要求を吸い上げる上で有益である。この研究会の成果は、TEF の多目的利用装置の詳細な応用リストの明確化、また恐らく、吸い上げた利用者の要求を満たすため多目的利用装置（またはその一部）の基本設計の変更に繋がる。

2.6 施設設計

所見

施設のレイアウトと電気設備への要求について示された。ISOL 加速器のスペースがかなり狭い。ISOL の電気容量が施設全体の約半分である。放射化機器の保管方法について示されなかった。T-TAC2 の勧告はよく反映されている。

勧告

- 2.6.1 ISOL 施設をターゲットステーションとは別の階にすることを検討せよ。
- 2.6.2 ユーザーの容易なアクセスを確保せよ。
- 2.6.3 使用済みターゲットや放射化機器の保管エリアについて、詳細な実験計画と施設の寿命中に保管するターゲット数を考慮して慎重に設計すべきである。
- 2.6.4 ISOL が配置やユーティリティに大きく影響を与えている。実験装置（スペクトロメータ）や RI ビームの後段加速器用冷凍機の空間を含め、ISOL の場所を決定するための詳細設計を行うことが重要である。
- 2.6.5 多目的利用エリア（ISOL 施設）の電力要求は明らかに過小評価である（2 倍の 4.5 MW 程度では）。機器リスト（低温設備、LINAC、ビームライン、実験装置、ISOL ターゲットシステム、RF システム、冷却・空調装置、等）をもとに、ISOL の電力要求を見直すべきである。恐らく、低温設備 1.5 MW、電力変換装置 1.2 MW、冷却・空調装置 1 MW、電気系 0.3 MW、RF 系 0.4 MW、真空系 0.1 MW 程度ではないか。

2.7 制御システム

TEF-T 全体制御システム（GCS）、及び人員安全保護システム（PPS）を含むサブシステムの概要について紹介された。

勧告

- 2.7.1 異常検知からビーム停止までの時間遅れについて検討せよ。この情報は、復旧シナリオや安全解析の検討において必要である。
- 2.7.2 ユーザー設備から制御系への要求を明確にせよ。

3. TEF-T 設計のための実験と結果

3.1 TEF-T ターゲットモックアップループ - IMMORTAL

TEF-TターゲットモックアップループはIMMORTALと改名された！ IMMORTALはTEF-Tターゲットシステムの一次冷却系の実現可能性を実証するための試験ループである。熱交換器（HX）設計の詳細見直しが始められたことにより、T-TAC2勧告への対応である、旧フィンチューブ式HXの温度マージンとHX設計の見直し（ウォーターハンマーリスクの最小化）に適切に取り組みられた。さらに前回T-TACの勧告により、LBEターゲットシステムの過渡的振る舞いを評価するため、IMMORTALのRELAP5モデルも整備された。

所見とコメント

【IMMORTALの】試験運転と統合試験は既に実施された。電磁流量計との比較において絶対計測器と位置付けられる超音波流量計の開発は、非常に重要である。液体重金属中では音速が極度に速いため、信頼できる流速情報を得るためには極めて速いデータ取得・処理システムを必要とする。データ伝送・記録と処理装置に対するこれらの極めて高度な要求の他に、環境条件に起因するいくつかの制約にも適合しなければならない。200°C以上に昇温するため、温度がセンサに影響せぬよう音響ガイドが工夫された。この統合されたプローブは、液体金属中で620°Cまでの温度で作動することができる。第2に、センサと流体の音響結合は確実でなければならず、それにはセンサが物理的に濡れていなければならない。これは、センサを流体へ挿入する前にプローブ表面に犠牲的なニッケル層を付加することにより、一時的に達成される。LBE中でこのニッケル層は溶かされ、一定期間表面の濡れを確保する。しかしながら、運転開始後数日でセンサ表面の濡れは失われる。

熱交換器の2次冷媒は加圧水、出口温度は200°C、水圧は2 MPaである。200°Cの加圧水の飽和蒸気圧は1.45 MPaであるが、2 MPaでの沸点は213°Cであり、小さい温度マージンしかない。サブクール沸騰が即座に発生し、水流の中で沸騰気泡が崩壊する。仮に発生した蒸気のある程度が周期的にサブクール水によって取り囲まれた場合、蒸気の急速な凝縮により、ウォーター

ハンマーが起こり得て、その結果として熱交換器が損傷する。その対策として改善がなされた熱交換器の設計（二重壁管及びその中間層にHeガスを充填）は妥当である。

勧告

- 3.1.1 電磁流量計と比較することにより、超音波流量計の精度と長期安定性を実証せよ。
- 3.1.2 高温の油がHeガスの代替となり得るか調べよ。
- 3.1.3 改善型熱交換器の設計をIMMORTAL試験で実証せよ。

3.2 高温腐食試験ループ - OLLOCHI

高温試験ループはOLLOCHIと改名された！ 2016年末のOLLOCHIの状態（ステップ1）は、ループの組み立てと酸素濃度制御装置を含むLBE無しの調整運転が終了したところである。遠隔監視システムを仕上げ、第3試験部に機械強度試験装置を組み込む次のステップ（ステップ2及び3）は、2017年末までに予定されている。

所見とコメント

第1回及び第2回T-TAC会合以来、本試験ループの目的と目標は良く定められている。しかしながら、今回報告された新しい計画は、2015年10月のT-TAC会合の勧告全てを反映しているわけではない。

- 両試験部への2つの超音波流量計の組み込みはもう少しで終わる（ステップ2）。その後、それらの出力と、ポンプの下流に新たに設置された電磁流量計の信号との比較が出来るようになる。
- 試験部の流れ場の詳細なCFD解析は今までのところなされていない。これは、膨張タンク内部で試験片ホルダの孔からLBEが流出する設計であるために必要である。
- 低温配管用のSUS316の代替として、オーステナイト鋼JPCA (15-15Ti) が考えられる。
- 最新の設計見直しで、引張り試験や疲労試験用の機械強度試験装置に接続される第3試験部が導入された。この導入と、これが実際にどのようにLBE主配管と接続されるかにより、長期の腐食試験を行うOLLOCHIループの運転に大きな影響が予想される！さらに、少なくとも、試験片表面の酸素濃度やLBE流速の条件については評価や制御が難しいと思われる。
- OLLOCHIループ内の酸素濃度を制御する自動ガス混合装置が今のところ存在しない。

勧告

- 3.2.1 膨張タンクへの流れを含む2つの試験部の詳細なCFD解析は、必ず行われなければなら

ない。

- 3.2.2 ループ運転中にどのように腐食試験片を試験部に挿入・交換するのか、手順と計画を示せ。
- 3.2.3 OLLOCHIループ内を望ましい酸素濃度に維持するために、膨張タンク内でどのようにガスを混合するのか、その方法を示せ。
- 3.2.4 ループ運転への異なる要求のため、ループ運転に十分な経験を積むまでは（少なくとも来年中は）、試験装置へ接続せずにOLLOCHIを運転することを検討せよ。「プランB」【代替プラン】を準備せよ。
- 3.2.5 予算状況に基づいて実験計画（スケジュール）を更新あるいは改訂せよ。

3.3 酸素センサとポテンシャル制御

酸素濃度制御も含め、電気化学式酸素センサによる酸素濃度測定との目的と方針がよく位置付けられている。第1、2回のT-TACにおけるほとんどの勧告が考慮されている。

現在の校正方法は、基本的に適切であるが...

所見とコメント

センサ校正のための $\text{Fe}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 参照極の使用は、様々な酸化鉄、つまり様々なポテンシャルの存在により、【酸素濃度と出力電圧が】一対一対応しない。

センサ出力のガンマ線照射に対する感度は、おそらくセンサ内部に使われているプラスチック素材の劣化による（例えば、BNCプラグの絶縁材）。

勧告

- 3.3.1 Pt/Air型センサの校正には、Pb/PbO（飽和）やCo/CoOを参照極としたものを用いよ。
- 3.3.2 酸素センサヘッドの再設計もしくは遮蔽を検討せよ。
- 3.3.3 1年以上にわたる酸素センサ出力安定性の長期試験がまだなされていない。
- 3.3.4 LBE流動下で用いる場合は、酸素センサのセラミック管周りにスチール製保護シースを使うことを検討せよ。

3.4 フリーズバルブ開発

ニードル型ベローズバルブでは漏洩が発生するため、機械式バルブの数は最小限に減らすべきであり、これはT-TACの経験とも一致する。しかしながら、ターゲットループにいわゆるフリーズシールバルブを組み込むことにより、ループシステム全体の信頼性と安全性へ影響するであろう。なぜならLBEは固化後に時間とともに膨張し、高い機械的応力が配管系の構造鋼材の強度を上回ると、配管系に機械的破損を生じさせるためである。機械的応力の大きさは、冷却速度、冷却開始温度、及び固化状態の経過時間に依存する。

第2回T-TAC会合の勧告に従い、ひずみゲージを装着した容器を用い、冷却速度を関数としたLBE固化中の熱膨張試験は適切に実施された。その優れた結果は、MEGAPIE計画におけるPSIによる初期のデータと良く一致している。開始温度150°Cから毎分3°Cの冷却速度で生じた歪みと応力は、400°CにおけるSS316鋼の許容応力を下回っている。

勧告

- 3.4.1 配管鋼材中の応力レベルを最大引張強度以下に維持するため、「実際」のLBEの冷却速度が決して毎分約3°Cより早くならないことを保証せよ。これは、加熱系／冷却系の運転制御に必要な外部電源が失われる「全電源喪失」の場合にも、保証されなければならない。
- 3.4.2 フリーズバルブの実現可能性を確認するため、フリーズバルブの配管形状を模擬した応力解析を実施せよ。

4. 陽子ビーム輸送

4.1 L-TEF BT とニュートロニクス設計と研究

所見

前回 T-TAC 報告書記載の勧告について適切な対応がなされ、残された課題が明確に認識されている。

勧告

- 4.1.1 付帯設備（レーザ室、電源、ISOL 用高周波設備）の設置場所が十分にあることを確認せよ。
- 4.1.2 ビームプロファイルモニタの設計について、ESS との協力を推進せよ。
- 4.1.3 短バンチビームへの適用するためのレーザ荷電変換技術を開発せよ。
- 4.1.4 断面積測定とその比較により、PHITS コードを系統的に検証せよ。

4.2 レーザによる TEF-P 向けビーム引き出し

所見

目標を達成したことについて、研究チームへ祝辞を伝えたい。3-MeV の負水素イオンビームを使ったレーザ荷電変換試験において、非常に良い結果が得られた。この技術の弱点は、レーザ光窓である。

勧告

- 4.2.1 【負水素イオンの】ビームエミッタンスの系統的測定実施を検討せよ。
- 4.2.2 窓を別の材料に換えるか、適切な計測システムを開発するか、いずれかを実施せよ。

5. 安全性

5.1 基本方針及び故障影響分析（FMEA）

安全方針、及び故障影響分析（FMEA, Failure Mode and Effect Analysis）の例を含む安全解析の手順が示された。J-PARC MLF の安全保護システムは前例として役に立つ。安全解析は未だ進行中である。

コメント

復旧シナリオはいずれにしても必要であるが、一般的な故障と事故とを区別する必要がある。いくつかの想定事象は、事象検知後のビーム停止のタイミングに依存する。従って、加速器グループとの緊密な連携が必要に思われる。

勧告

5.1.1 リスクレジスタ（事象の特定と軽減）を確立せよ。

5.1.2 全ての関連する「起因事象」を特定せよ。

訳注：リスク・レジスタ（risk register）とは、リスクアセスメントの結果に基づいて、顕在化する可能性の大きさや、顕在化した場合の影響の大きさ、事前予防策、顕在化した場合の対処方法、これらを加味した評価スコア等をまとめた表で、リスクマネジメントやプロジェクトマネジメント等で用いられる。

5.2 鉛ビスマス漏洩事象の解析

250kW 運転時かつ最高鉛ビスマス温度（550°C）の条件下、鉛ビスマス漏洩事象の影響が評価された。事業所境界における内部及び外部被ばく量が保守的な仮定に基づいて計算された。

所見

鉛ビスマスの最高温度において、得られた被ばく量は約 300 μ Sv であった。より低温（300°C）の鉛ビスマス温度で評価すれば、この値は大きく減少する。放射線防護規則に示されているように、放射線作業従事者以外の者（一般公衆）の年間被ばく量限度は 1 mSv である。

勧告

5.2.1 JEND や ENDF に収納されているガンマ線のデータは、実際の値と異なる場合がある。他のガンマ線データとの比較により、エネルギーと強度を確認せよ。

5.2.2 【解析結果の】信頼性の指標として、核破砕反応による生成核種の予測精度について言及すべきである。

5.3 TEF-T の遮蔽設計

所見

ターゲットステーション、ホットセル及びビーム輸送系を含めた TEF-T の遮蔽設計の現状が示され、250 kW 運転時に事業所境界において実効線量率を 10 $\mu\text{Sv}/\text{年}$ 未満に出来ることが確認された。

ISOL 施設（相当地に大きい線源）の運転はこの解析に含まれておらず、かなりの遮蔽が必要になるだろう。

勧告

5.3.1 放射性廃棄物（使用済み ISOL ターゲット）の保管、及び冷却水と地下水（外部境界へ通じる）の放射化【に対する遮蔽】を検討せよ。

5.3.2 ISOL 機器（ISOL ターゲット、質量分析器、LINAC 後段加速器）の遮蔽を検討せよ。

6. TEF-P の概要

所見とコメント

TEF-P は、マイナーアクチノイド（MA）の核変換効率や MA 燃料のより一般的な物理の評価を行う点において、日本や世界において明確な役割を有している。

そのような汎用目的の試験施設は、様々な燃料や中性子スペクトルの条件下で核変換効率を評価できるよう TEF-P をより「多目的」とすることで、世界中の他のグループからの興味を容易に引きつけ、プロジェクトの資金と継続性を確保できるだろう。例えば、

- MA のみの燃料
- Pu が入った MA 燃料
- 個々の MA 燃料（Np、Am、Cm、Np+Am、他）
- 高速中性子スペクトル、わずかに減速されたスペクトル（10-100keV）、非常に硬いスペクトル、熱外/共鳴の中性子、他
- 高速スペクトルにおける Th-MA 燃料

中性子スペクトルを変えたときの反応度係数変化の評価は興味深い。これらの基本的データ取得後に、試験領域に MA 燃料ピンを装荷したフル炉心実験を行うことができる。たとえ試験領域に Cm のような MA を多く装荷することは難しいとしても、箔や試料を使った反応率比の測定（Pu-239 や U-235 核分裂反応に対する Am-241、Am-243、Cm-244 の捕獲反応や核分裂反応

など) が場合によっては【可能であろう】。同様の試験を Tc-99 や I-129 などの長寿命核分裂生成物についても行うべきである。

被覆管破裂実験において、内圧と温度上昇率は確かに重要なパラメータである。しかしながら、30 年もしくは 50 年貯蔵した MA 燃料の安全評価は非常に保守的である。

勧告

- 6.1 実験内容とスケジュールを適切に再設定せよ。
- 6.2 炉物理チームを強化せよ。
- 6.3 ADS のパラメータと核変換効率を最適化するため、全ての可能な構成を検討せよ。
- 6.4 He 生成とその放出に影響を与えるため、荷電粒子による燃料照射を検討せよ。
- 6.5 現在は均一なピンの温度分布を仮定しているが、非均一な場合のモデルを検討せよ。
- 6.6 核計装：全ての既知の技術（ロシアの BFS【オブニンスク IPPE の高速臨界実験装置】、英国の PFR【高速原型炉（Prototype Fast Reactor）】）のレビューを行い、また遠隔操作システムの簡素化のためマイクロ核分裂計数管の（横方向に代わり）軸方向挿入を検討せよ。
- 6.7 燃料取扱システム：放射線に対する感度（光学機器、カメラ、電子機器）を評価し、バーコード読取り式ではない別の方式や冗長なシステムが必要かどうかを評価し、ロボットアームに有機材料の使用を避け、全ての炉心構成機器（核計装、燃料ピン、ターゲット、制御棒、他）を扱える遠隔操作機器を設計せよ。

結論

2016年12月12-14日、東海村のJ-PARCにて核変換実験施設（TEF）計画の技術諮問委員会 T-TAC が開催され、そして LINAC 建家、SAFER 棟、高温工学特研の実験室に加え、TEF 建設予定地を視察した。

T-TAC メンバーは、本計画に対する J-PARC チーム関係者による深い関与と 2015 年 10 月の前回 T-TAC 以降になされた進捗を認める。T-TAC の LINAC 建家視察で実演されたように、3-MeV ビームを用いた予備的なレーザ荷電変換（LCE）実験において優れた結果が得られている。J-PARC LINAC ビーム条件換算で出力約 5 W 等価の H⁺ビームが得られた。この出力は、TEF-P の陽子ビーム要求出力をほぼ満足するものである。

前回T-TAC以降、核変換ディビジョンにスタッフが増員されたというものの、詳細設計及び申請書類の完成と現在計画されているTEF-TとTEF-BTの建設段階への移行には、TEFチームの更なる強化及び建設チームの設立が必要であると、T-TACは評価する。

本報告書に記載した所見、コメントと勧告は、発表及び会合中に T-TAC に提供された情報に基づくものである。今回の T-TAC によるレビューには、TEF-T の技術設計書（TDR）ドラフト版は考慮されていない。TEF-T の概念設計段階を完結させるため、T-TAC は TDR ドラフト版に計装、廃棄物評価と施設解体の節を追加して完成させることを勧告する。

T-TACは、MYRRHA等のADS開発を進めている他の機関との協力と共同の教育・訓練プログラムの実施を強化するとともに、TEFにおける研究計画の遂行と産業への応用に向けて関連するコミュニティに対しTEFの可能性をアピールすることを、そして最後に、TEF計画の見通しを高めるためにPR活動を継続することを、強く奨励する。

ADSターゲット試験施設（TEF-T）及びマイナーアクチノイド燃料を用いた炉物理を研究する未臨界炉TEF-Pの建設に向けた課題について、関係するJ-PARCチームにより見事に取り組まれているとT-TACは確信する。両システムは世界の中でも傑出し、かつユニークであり、高レベル廃棄物を大規模に核変換処理できるADSの建設に必要な物理、材料そして工学データの開発に大いに貢献するであろう。

本報告のセクション毎の勧告のまとめ

1. J-PARC TEF 計画の概要

- 1.1 TEF 計画の見通しを高めるため、PR 活動を継続せよ。日本の原子力及び非原子力の企業団体に向けて計画を紹介し、他のコミュニティ（高速炉や地層処分等）の専門家への説明により計画の信憑性を維持するとともに公開討論での専門家間の衝突を回避し、一般向け TEF 紹介のウェブサイトを再考（内容を科学的にし過ぎず、一般の関心を引く応用事例集を追加し、メディア・ギャラリーを追加するなど）せよ。

2. TEF-T 設計の詳細

2.1. ターゲットシステムと保守

- 2.1.1 新ターゲット容器を再溶接する前に、ターゲット配管に固着したLBEを適切に除去する手法を実証せよ。
- 2.1.2 配管再溶接前のLBE除去の品質確認手法を開発せよ。
- 2.1.3 【溶接後の】熱処理とその後の室温への空冷を含め、これに必要な可搬式外部ヒータの可能性を追求せよ。

2.2 ターゲット設計

- 2.2.1 IMMORTALでの試験の前に、SUS316とT91鋼製の選定したターゲット設計について、その機能をフル3次元流動解析によって実証せよ。
- 2.2.2 SUS316との比較において、T91鋼の液体金属脆化のリスクを検討せよ。その結果はターゲット設計にどのような影響をもたらすであろうか？
- 2.2.3 Aタイプ、Bタイプ、Cタイプのターゲット容器が適切な結果を与えない場合、ビーム窓中央のよどみ域回避のため、ターゲット中にバイパス流れを導入し、「Bタイプ」として検討せよ。

2.3 ターゲットステーション

- 2.3.1 陽子ビームの分布（エネルギー密度、ビームエミッタンス他）を考慮しつつ、陽子ビーム窓の影響について評価せよ。
- 2.3.2 中性子ビームライン及び多目的利用ターゲットとの統合について検討せよ。遮蔽に与える影響はどうか？

2.4 照射と照射後試験計画

- 2.4.1 試料周りの流れの様子を評価し、エロージョンについて確認せよ。
- 2.4.2 ターゲット設計決定の後、詳細な照射条件と照射後試験計画（ターゲット容器と試料）を定めよ。

2.5 多目的利用

- 2.5.1 【中性子ビーム照射場の】空間分布の検討にあたり、ターゲット上の中性子分布を考慮すべきである。
- 2.5.2 ユーザーにとってもう一つの重要な情報として、検出場所【中性子ビーム照射場】でのエネルギースペクトルを検討せよ。
- 2.5.3 想定している研究テーマに関係する潜在利用者を集めた研究会を開催することは、彼らの要求を吸い上げる上で有益である。この研究会の成果は、TEF の多目的利用装置

の詳細な応用リストの明確化、また恐らく、吸い上げた利用者の要求を満たすため多目的利用装置（またはその一部）の基本設計の変更に繋がる。

2.6 施設設計

- 2.6.1 ISOL 施設をターゲットステーションとは別の階にすることを検討せよ。
- 2.6.2 ユーザーの容易なアクセスを確保せよ。
- 2.6.3 使用済みターゲットや放射化機器の保管エリアについて、詳細な実験計画と施設の寿命中に保管するターゲット数を考慮して慎重に設計すべきである。
- 2.6.4 ISOL が配置やユーティリティに大きく影響を与えている。実験装置（スペクトロメータ）や RI ビームの後段加速器用冷凍機の空間を含め、ISOL の場所を決定するための詳細設計を行うことが重要である。
- 2.6.5 多目的利用エリア（ISOL 施設）の電力要求は明らかに過小評価である（2 倍の 4.5 MW 程度では）。機器リスト（低温設備、LINAC、ビームライン、実験装置、ISOL ターゲットシステム、RF システム、冷却・空調装置、等）をもとに、ISOL の電力要求を見直すべきである。恐らく、低温設備 1.5 MW、電力変換装置 1.2 MW、冷却・空調装置 1 MW、電気系 0.3 MW、RF 系 0.4 MW、真空系 0.1 MW 程度ではないか。

2.7 制御システム

- 2.7.1 異常検知からビーム停止までの時間遅れについて検討せよ。この情報は、復旧シナリオや安全解析の検討において必要である。
- 2.7.2 ユーザー設備から制御系への要求を明確にせよ。

3. TEF-T 設計のための実験と結果

3.1 TEF-T ターゲットモックアップループ - IMMORTAL

- 3.1.1 電磁流量計と比較することにより、超音波流量計の精度と長期安定性を実証せよ。
- 3.1.2 高温の油が He ガスの代替となり得るか調べよ。
- 3.1.3 改善型熱交換器の設計を IMMORTAL 試験で実証せよ。

3.2 高温腐食試験ループ - OLLOCHI

- 3.2.1 膨張タンクへの流れを含む 2 つの試験部の詳細な CFD 解析は、必ず行われなければならない。
- 3.2.2 ループ運転中にどのように腐食試験片を試験部に挿入・交換するのか、手順と計画を示せ。
- 3.2.3 OLLOCHI ループ内を望ましい酸素濃度に維持するために、膨張タンク内でどのようにガスを混合するのか、その方法を示せ。
- 3.2.4 ループ運転への異なる要求のため、ループ運転に十分な経験を積むまでは（少なくとも来年中は）、試験装置へ接続せずに OLLOCHI を運転することを検討せよ。「プラン B」【代替プラン】を準備せよ。
- 3.2.5 予算状況に基づいて実験計画（スケジュール）を更新あるいは改訂せよ。

3.3 酸素センサとポテンシャル制御

- 3.3.1 Pt/Air 型センサの校正には、Pb/PbO（飽和）や Co/CoO を参照極としたものを用いよ。
- 3.3.2 酸素センサヘッドの再設計もしくは遮蔽を検討せよ。
- 3.3.3 1年以上にわたる酸素センサ出力安定性の長期試験がまだなされていない。

3.3.4 LBE流動下で用いる場合は、酸素センサのセラミック管周りにスチール製保護シースを使うことを検討せよ。

3.4 フリーズバルブ開発

3.4.3 配管鋼材中の応力レベルを最大引張強度以下に維持するため、「実際」のLBEの冷却速度が決して毎分約3°Cより早くなならないことを保証せよ。これは、加熱系/冷却系の運転制御に必要な外部電源が失われる「全電源喪失」の場合にも、保証されなければならない。

3.4.4 フリーズバルブの実現可能性を確認するため、フリーズバルブの配管形状を模擬した応力解析を実施せよ。

4. 陽子ビーム輸送

4.1 L-TEF BT とニュートロニクス設計と研究

4.1.1 付帯設備（レーザ室、電源、ISOL 用高周波設備）の設置場所が十分にあることを確認せよ。

4.1.2 ビームプロファイルモニタの設計について、ESS との協力を推進せよ。

4.1.3 短バンチビームへの適用するためのレーザ荷電変換技術を開発せよ。

4.1.4 断面積測定とその比較により、PHITS コードを系統的に検証せよ。

4.2 レーザによる TEF-P 向けビーム引き出し

4.2.1 【負水素イオンの】ビームエミッタンスの系統的測定実施を検討せよ。

4.2.2 窓を別の材料に換えるか、適切な計測システムを開発するか、いずれかを実施せよ。

5. 安全性

5.1 基本方針及び故障影響分析（FMEA）

5.1.1 リスクレジスタ（事象の特定と軽減）を確立せよ。

5.1.2 全ての関連する「起因事象」を特定せよ。

5.2 鉛ビスマス漏洩事象の解析

5.2.1 JEND や ENDF に収納されているガンマ線のデータは、実際の値と異なる場合がある。他のガンマ線データとの比較により、エネルギーと強度を確認せよ。

5.2.2 【解析結果の】信頼性の指標として、核破碎反応による生成核種の予測精度について言及すべきである。

5.3 TEF-T の遮蔽設計

5.3.1 放射性廃棄物（使用済み ISOL ターゲット）の保管、及び冷却水と地下水（外部境界へ通じる）の放射化【に対する遮蔽】を検討せよ。

5.3.2 ISOL 機器（ISOL ターゲット、質量分析器、LINAC 後段加速器）の遮蔽を検討せよ。

6. TEF-P の概要

6.1 実験内容とスケジュールを適切に再設定せよ。

6.2 炉物理チームを強化せよ。

6.3 ADS のパラメータと核変換効率を最適化するため、全ての可能な構成を検討せよ。

6.4 He 生成とその放出に影響を与えるため、荷電粒子による燃料照射を検討せよ。

6.5 現在は均一なピンの温度分布を仮定しているが、非均一な場合のモデルを検討せよ。

- 6.6 核計装：全ての既知の技術（ロシアの BFS【オブニンスク IPPE の高速臨界実験装置】、英国の PFR【高速原型炉（Prototype Fast Reactor）】）のレビューを行い、また遠隔操作システムの簡素化のためマイクロ核分裂計数管の（横方向に代わり）軸方向挿入を検討せよ。
- 6.7 燃料取扱システム：放射線に対する感度（光学機器、カメラ、電子機器）を評価し、バーコード読取り式ではない別の方式や冗長なシステムが必要かどうかを評価し、ロボットアームに有機材料の使用を避け、全ての炉心構成機器（核計装、燃料ピン、ターゲット、制御棒、他）を扱える遠隔操作機器を設計せよ。

Appendix I – 第 3 回 T-TAC アジェンダ

日 程： 2016 年 12 月 12-14 日

場 所： 原子力機構 東海 J-PARC センター研究棟 2 階 大会議室

12 月 12 日 (月)

- 8:30 テラスイン勝田をシャトルバス発 (ガイド：武井 早憲)
- 9:30 サイトツアー (TEF サイトでの写真撮影含む)
Linac 建家 (9:30-10:00、案内：武井 早憲)
Safer 棟 (10:05-10:35、ガイド：菅原 隆徳)
高温工学特研 (10:40-11:30、ガイド：斎藤 滋)
TEF サイトでの写真撮影 (11:35-11:45、ガイド：佐々 敏信)
- 12:00 昼食
- 13:30 ウェルカム (非公開、斎藤 直人)
- 13:35 T-TAC の任務 (非公開、斎藤 直人)
- 13:45 T-TAC メンバーによる非公開セッション
- 14:10 J-PARC 概要 (14:10-14:35、斎藤 直人)
J-PARC TEF 計画概要 (14:35-15:00、二川 正敏)
- 15:00 休憩
- 15:20 TEF-P 概要
TEF-P 設計の概要 (15:20-16:00、菅原 隆徳、福島 昌宏)
- 16:00 T-TAC メンバーによる非公開セッション
- 17:00 解散
- 17:00 テラスイン勝田に向けシャトルバス発
- 18:30 勝田地区にてディナー

12 月 13 日 (火)

- 8:30 テラスイン勝田をシャトルバス発 (ガイド：武井 早憲)
- 9:30 TEF-T 概要と技術設計書 (前川 藤夫)
- 9:45 TEF-T 設計詳細 (1)
ターゲットシステムと保守 (9:45-10:05、佐々 敏信)
ターゲット設計 (10:05-10:25、万 涛)
ターゲットステーション (10:25-10:45、木下 秀孝)
- 10:45 休憩
- 11:00 TEF-T 設計詳細 (2)
照射と照射後試験計画 (11:00-11:15、大久保 成彰)
多目的利用 (11:15-11:30、岩元 大樹)

- 施設設計 (11:30-11:50、木下 秀孝)
制御システム (11:50-12:10、酒井 健二)
- 12:10 昼食
- 13:30 TEF-T 設計のための実験と結果
IMMORTAL (13:30-13:50、大林 寛生)
OLLOCHI (13:50-14:10、斎藤 滋)
酸素センサとポテンシャル制御 (14:10-14:30、菅原 隆徳)
フリーズバルブ開発 (14:30-14:50、斎藤 滋)
- 14:50 休憩
- 15:10 陽子ビーム輸送
L-TEF BT とニュートロニクス設計と研究 (15:10-15:30、明午 伸一郎)
レーザによる TEF-P 向けビーム引き出し (15:30-15:50、武井 早憲)
- 15:50 安全性
基本方針と故障影響分析 (15:50-16:15、佐々 敏信)
鉛ビスマス漏洩事象の解析 (16:15-16:35、岩元 大樹)
TEF-T の遮蔽設計 (16:35-17:00、岩元 大樹)
- 17:00 T-TAC メンバーによる非公開セッション
- 18:00 解散
- 18:00 テラスイン勝田に向けシャトルバス発

12月14日(水)

- 8:30 テラスイン勝田をシャトルバス発 (ガイド: 武井 早憲)
- 9:30 T-TAC メンバーによる非公開セッション
必要に応じ、宿題への回答を含む
- 12:00 昼食
- 13:30 T-TAC メンバーによるまとめの講演
- 14:20 結び
- 14:30 解散
- 14:30 テラスイン勝田に向けシャトルバス発

Appendix II – J-PARC による T-TAC 2015 の責務

斎藤 直人

T-TAC に対し、主に次に掲げる責務について助言を求める。

- 核変換技術開発に貢献するという TEF-T と TEF-P 両施設を含む TEF 全体の主目的に、基本パラメータが合致しているかどうかの妥当性
- 陽子ビーム輸送並びに TEF-T の鉛ビスマスターゲットシステム及び関連システムに関する、安全方針、運転及び保守計画を含めた実現可能性
- 計画の適切さ（資源と工程）
- 施設設計と研究開発活動に対する通常の勧告に加え、TEF 設計を完結させるために残された課題の指摘、及び国際協力や広報活動を含めた課題解決への助言

Appendix III - 2015 年の T-TAC 委員

氏名		所属	専門分野
1	Marc Schyns (議長)	ベルギー原子力研究センター	ADS技術
2	Yacine Kadi	欧州原子核共同研究機構	ADS及び核破砕ターゲット技術
3	鬼柳 善明	名古屋大学	核破砕ターゲット技術
4	Jürgen Konys	カールスルーエ工科大学	鉛ビスマス応用技術
5	Eric Pitcher	欧州核破砕中性子源	ADS及び核破砕ターゲット技術
6	高橋 実	東京工業大学	鉛ビスマス応用技術
7	竹田 敏一	福井大学	原子炉工学