

**核変換実験施設（TEF）
テクニカルアドバイザー委員会**

2019年2月14-15日
東海村

T-TAC 2018 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. TEF-T の概要	6
1.1 LBE ターゲットシステム.....	6
1.2 ターゲットステーション、ビーム輸送および建家	7
1.3 技術設計書およびコスト評価.....	7
2 R&D 活動-1: LBE 核破砕ターゲット技術.....	8
2.1 IMMORTAL の計装と運転 - IMMORTAL の熱流動解析	8
2.2 高温腐食の研究およびフリーズバルブ開発.....	8
2.3 乱流 LBE 流れによる SUS316L の流動促進腐食 (FAC).....	9
2.4 LBE 中の不純物挙動	9
3. R&D 活動-2: 陽子ビーム関連研究.....	10
3.1 レーザ荷電変換による長パルス取り出し.....	10
3.2 ADS および TEF 設計のための核破砕モデルの改良	10
3.3 弾き出し断面積測定と陽子ビーム関連機器.....	11
4. 将来計画	12
4.1 ADS 開発のための材料研究活動	12
4.2 J-PARC における陽子照射施設概念	12
結論	13
本報告のセクション毎の勧告のまとめ.....	14
Appendix I – 第 5 回 T-TAC アジェンダ	17
Appendix II – J-PARC による T-TAC 2018 の責務.....	19
Appendix III - 2019 年の T-TAC 委員.....	20

要 旨

2019年2月14-15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、高温特研の鉛ビスマスループおよび物質・生命科学実験施設を視察した。

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、齊藤直人 J-PARC センター長に感謝する。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 2018 年の前回 T-TAC 以降になされた進捗、さらにプロジェクトが前回 T-TAC における勧告について注意深く検討してきたことを認める。

T-TAC は、良くまとめられた英語版の TEF-T 技術設計書が準備され、また TEF-T の概念設計が完結するとともに基本設計が順調に進捗したと考える。提案された【ADS 研究開発の新たな】アプローチは、加速器および標的技術分野における J-PARC の優れた専門性に立脚しており、また ADS 計画のみならずその他の大強度加速器応用も包含する領域を扱おうとしている。T-TAC は、提案された応用は妥当であり、技術的に達成可能であることが分かった。しかしながら、合理的な期間内に計画を実現するため、T-TAC は、プロジェクトにより多くの人員を充てることを推奨する。

T-TAC は、ベルギー-MYRRHA 等の類似プロジェクトを進める研究機関との協力をさらに強化するとともに、TEF 計画を潜在的な利用者コミュニティに宣伝することを、強く推奨する。

はじめに

2019年2月14-15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、高温特研の鉛ビスマスループおよび物質・生命科学実験施設を視察した。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。委員会メンバー全員（付録Ⅲ）が、2日間の会合に参加した。

この報告書に含まれる所見、コメントおよび勧告は、委員会中に T-TAC に示された報告と情報に基づく。

1. TEF-T の概要

1.1 LBE ターゲットシステム

所見

想定されるADSではビームが垂直にターゲットに入射する。一方で、TEF-Tではビームが水平にターゲットに入射する。これによる差、例えば重力の効果について、チームにより検討が行われている。

ADS (1.5 GeV)とTEF-T (400 MeV)のビームエネルギーの差についても、放射線損傷の効果を調べ、TEF-Tで得られる知見を将来のADSへと読み替えるとして、考慮がなされている。

ターゲット先端部の設計は対称に見えるが、最も冷却が必要な部位である中心部における流れの剥離を防ぐために、流れは僅かに非対称に設計されている。

ビームの偏心に伴うターゲット温度変化の感度について、チームにより検討が行われている。

試験的な幾何学的条件下での溶接試験により、非常に有望な溶接シームが得られた。

コメント

TEF-Tは、ホットスポットの流れを改善し、またターゲットのビーム入射窓部の温度と熱応力を低減するために流動パターンを最適化する努力を認める。しかしながら、T-TACは、更なる最適化がまだ可能であると考えられる。

LBEの不安定性ならびに過渡現象は、さらに解析を行わなければならない。過去のESS水銀ターゲット設計の経験から、理論的に対称な流動パターンは不安定な流れ条件につながる可能性がある。

勧告

- 1.1.1 より現実的な条件下での溶接試験を実施すべきである。これには、溶接シームの品質を低下させる可能性のある、配管内側表面にLBEが残存している場合や、望まぬ合金化や溶接シームへの取込みが考えられる核破碎生成物を考慮した場合が含まれる。
- 1.1.2 放射化した配管や残留LBEは γ 線バックグラウンドとなることから、溶接配管のX線品質検査を難しくする可能性がある。品質検査にX線が使用可能かを確かめるため、 γ 線バックグラウンド強度を評価すべきである。
- 1.1.3 バキュームベッセルは、ターゲット漏洩時の境界として使われる。バキュームベッセル内にLBEが漏洩した場合にどのように回復させるのか、その方法を検討すべきである。

1.2 ターゲットステーション、ビーム輸送および建家

所見

T-TACは、既存のMLFの知見が生かされていると認める。

コメント

T-TACは、四重極電磁石の故障により収束されたビームが導入され、TEF-Tターゲットを損傷する可能性について心配する。迅速で信頼性の高い検知システムは、安全なビーム輸送を確実にするための対策として有効であろう。そのようなシステムの開発については、明午による‘Displacement cross section measurement and proton beam related instrument’の報告の中で示された（3.3節参照）。

1.3 技術設計書およびコスト評価

コメント

T-TACは、技術設計書の編集および【英文への】翻訳を完結させた努力に注目する。本設計書は、2019年1月に委員に配布された。T-TACは、「解体」に関する章は後日に延期されたことを認める。「はじめに」の章で示されているように、本設計書は2016年時点の施設設計を纏めたものである。

T-TACは、目次の表から、すべての側面（【プロジェクトの】範囲、設計パラメータ、機器に関する記述、安全性など）に取り組みされており、TEF-Tの概念設計が完了し、その基本設計が十分に進捗していると認める。

勧告

- 1.3.1 T-TACは、設計書を最新の状態に保つこと、また重大な変化が生じ、プロジェクトの組織、スケジュールおよびコストの各要素が定義された場合、これらが与える影響を評価することを推奨する。
- 1.3.2 TEF-T建設費の評価手法が報告された。類似の高出力加速器のコストとの比較は、積み上げのコスト計算が現実的であることを示している。T-TACは、報告されたコストには予備費が含まれていないことについて留意する。物価上昇による問題を回避するため、外部公開にあたっては常にコスト評価の年を明示することを推奨する。

2 R&D 活動-1: LBE 核破碎ターゲット技術

2.1 IMMORTAL の計装と運転 - IMMORTAL の熱流動解析

所見

T-TACは、前回T-TACの勧告への回答に感謝する。IMMORTALの建設と運転は成功裏に達成された。チームに祝意を表す。モックアップシステム運転の最初のデータがうまく取得された。液体金属ループ、水ループおよび熱交換器の動作について、よく調べられている。熱交換器に関するRELAPコードを用いた解析は、熱伝達現象を理解する上で非常に役立つ。

安全関連の計装には触れられなかった。T-TACは、そのような場合【安全関連の計装】については、冗長性と多様性を取り入れる必要があることに注意を促す。

コメント

T-TACは、酸素センサの耐放射線性が評価された点に着目する。その他の計装について、情報は示されなかった。

勧告

2.1.1 T-TACは、【IMMORTALの】運用経験の蓄積を継続するよう推奨する。並行して、Pb-Bi系の化学的側面に焦点を当てたその先の運転の検討を開始せよ。独特の形状と配置を有するIMMORTALのターゲット容器は、ターゲット領域周りの腐食や質量移行を検討するのに有用だろう。IMMORTALシステムを用い、金属および非金属不純物の化学的管理に関する方法論を検討すべきである。

2.1.2 熱伝達係数と酸素濃度の【関係に関するデータ】取得を検討せよ。

2.2 高温腐食の研究およびフリーズバルブ開発

所見

腐食試験装置“OLLOCHI”が建設された。様々な材料に対し、化学的適合性と機械特性に関する様々な試験がすぐに始められる予定である。フリーズバルブ開発のための実験が開始された。T-TACは、この手法は受動的に動作すると認識する。

勧告

2.2.1 OLLOCHIによる腐食試験の条件は、TEF-TシステムとADSシステムの運転条件に基づいて十分に検討すべきである。流動条件は、腐食および質量移行の挙動の観点から決定すべきである。質量移行に関するいくつかの無次元数は、平均流速と同じと考えるべきである。

2.2.2 フリーズバルブ周辺の応力を測定する実験は、フリーズバルブの実際の使用状況を模擬した条件で行うべきである。

2.2.3 中性子イメージングによる【LBEの】固化過程の測定は既に行われている。固化過程の観察には、歪みゲージ測定と組み合わせた固化中の中性子透過測定が直接的な情報を与えるであろう。そのような実験の実現可能性について議論すべきである。ブラッグエッジ透過手法による歪み測定の可能性についても、将来研究のための検討項目の一つであろう。

2.3 乱流 LBE 流れによる SUS316L の流動促進腐食 (FAC)

所見

流動LBE中におけるオーステナイト鋼SUS316LのFAC挙動に関する解析研究が行われ、いくつかの初期の結果が得られた。その結果から、腐食挙動のいくつかの傾向は数値解析により予測可能であることが示された。現在までに、小さな領域における腐食と質量移行挙動が解析された。

勧告

2.3.1 T-TACは、温度勾配が存在するより大きな領域に対する解析を行うことを推奨する。

2.4 LBE 中の不純物挙動

所見

核破砕生成物【の生成量】が計算され、揮発性化合物が抽出された。LBE中の不純物の化学的挙動が理論的に評価された。

コメント

核破砕生成物の生成量の信頼性は重要であり、より詳細なデータが必要である。

PoやHgなどの主要放射性元素の質量移行挙動も重要なトピックである。T-TACは、SCK・CENとの協力を開始する努力を評価する。

勧告

2.4.1 今後の仕事として、中性子照射による元素生成に伴う酸素ポテンシャルの変化を評価すべきかも知れない。

2.4.2 T-TAC は、J-PARC を用いた核破砕生成物【の生成量】の実験的検証を強く支持する。

3. R&D 活動-2: 陽子ビーム関連研究

3.1 レーザ荷電変換による長パルス取り出し

所見

3 MeVのビームラインにおいて、レーザ荷電変換技術により、長パルス状のH⁺ビームの取り出しに成功した。

コメント

T-TACは、TEF-Pに必要なビーム方向制御のための基本技術が確立され、本分野における今後の活動は計画されていないと認識した。

3.2 ADS および TEF 設計のための核破砕モデルの改良

所見

T-TACは、本研究は非常に有用であると考えます。コードの相互比較は常に望ましいことである。

コメント

例えば Titarenko による (IAEA, report “Experimental and theoretical study of the yields of residual product nuclei produced in thin targets irradiated by 100-2600 MeV protons”) のような実験データが存在し、これらを利用したコードのベンチマークが可能である。

実験データとの一致を改善するために、GEM核分裂モデルの改良を継続せよ。

CSNS核破砕中性子源は後方ビームラインを有する。これは、【J-PARCで行っている】後方中性子研究の有用な参考の1つとなる。

勧告

- 3.2.1 低Z元素 (Be, B, ..., Na) の収量を増やすためのモデルの改良として、INCおよび蒸発過程において軽～中重同位体を放出する「フラグメンテーション」を導入せよ。
- 3.2.2 GEMに代わる蒸発モデルとして、PHITSへのABLA v. 7の導入を検討せよ。
- 3.2.3 核破砕生成物測定の実験を継続すべきである。γ線を放出しない同位体 (Cl-36, Fe-55, Fe-60 ...) に測定を拡張する必要性を評価せよ。

3.3 弾き出し断面積測定と陽子ビーム関連機器

所見

ターゲット上における陽子ビームプロファイルを詳細に把握することは極めて重要である。他のプロジェクトや施設 (ESS、SNSなど) との協力で、TEF-Tのためのいくつかの異なる陽子ビームモニタ概念が現在研究されている。

弾き出し断面積が測定され、計算モデルとの比較が示された。

コメント

発光材料塗布によるBPM【ビームプロファイルモニタ】の概念は、【検討を】継続すべきである。TEF-Tビームラインにおいて、できるだけ多くのビームプロファイルモニタ設置を検討せよ。1台のモニタ故障時においても、ビームパラメータの情報を確実に取得できるよう冗長性を持たせよ。

DPAはビーム窓の寿命を決める重要なパラメータである。実験的研究が推奨される。

勧告

- 3.3.1 さまざまな物理的原理（ハープモニタ、発光材料塗布、熱電対）に基づくBPMを使用せよ。ある期間の照射後に発光材料の劣化が著しく明瞭な信号が得られないことが判明した場合、ハープモニタ、またはVIMOSのようなビームモニタを使用せよ。
- 3.3.2 センサ領域にわたって平坦なビームプロファイルは、陽子束の誤差を少なくする。

4. 将来計画

4.1 ADS 開発のための材料研究活動

所見

材料認定プログラムの必要性が述べられ、新しい照射施設への要求が示された。第一原理計算から始まるマルチフィジックスモデリングの研究が開始された。

勧告

- 4.1.1 モデリング研究とTEF設計への要求との関係を明確にする必要がある。
- 4.1.2 材料研究活動のためのロードマップを作成する必要がある。

4.2 J-PARC における陽子照射施設概念

所見

LBEターゲット周辺での照射、半導体テスト、ISOL不安定核ビーム生成を含むTEF-Tの多目的利用が紹介された。T-TACは、PIE設備を備えた新しい照射施設の必要性を主張しているJ-PARCによって提示された新しいアプローチを認める。

勧告

- 4.2.1 同種の既存施設や計画中の施設との比較により、新しいTEF施設の独自性を確保せよ。

結論

T-TACは、TEF計画に係わるチームによる深い関与と前回T-TAC以降になされた進捗とともに、チームが前回T-TACにおける勧告について注意深く検討してきたことを認める。T-TACメンバーは、高温特研視察時に実演がなされた、IMMORTALのLBEループ運転によるデータ取得に対し、チームを祝福する。

本報告書に記載した所見、コメントと勧告は、発表および会合中にT-TACに提供された情報に基づくものである。T-TACは、良くまとめられたTEF-T技術設計書を評価するとともに、TEF-Tの概念設計は完結し、基本設計が十分に進捗していると認める。

T-TACは、J-PARCの加速器と標的技術分野における優れた専門性に基づき、新しい実験施設概念ではADS開発の枠を超えて目的を拡大しようとしていると認識する。T-TACは、提案された新たな応用は適切であり、技術的に可能であると考え。既存あるいは計画中の同種の施設と比較しつつ、新施設の新たな応用の独自性と実行可能性を検討すべきである。

T-TACは、適切な期間内に新施設を実現するために、本計画に係る人員を増強し、ベルギーMYRRHAのような類似プロジェクトを進める研究機関との協力をより進め、本計画を潜在的なユーザーコミュニティに対しアピールすることを推奨する。

本報告のセクション毎の勧告のまとめ

1. TEF-T の概要

1.1 LBE ターゲットシステム

- 1.1.1 より現実的な条件下での溶接試験を実施すべきである。これには、溶接シームの品質を低下させる可能性のある、配管内側表面にLBEが残存している場合や、望まぬ合金化や溶接シームへの取込みが考えられる核破碎生成物を考慮した場合が含まれる。
- 1.1.2 放射化した配管や残留LBEは、 γ 線バックグラウンドとなることから、溶接配管のX線品質検査を難しくする可能性がある。品質検査にX線が使用可能かを確認するため、 γ 線バックグラウンド強度を評価すべきである。
- 1.1.3 バキュームベッセルは、ターゲット漏洩時の境界として使われる。バキュームベッセル内にLBEが漏洩した場合にどのように回復させるのか、その方法を考案すべきである。

1.3 技術設計書およびコスト評価

- 1.3.1 T-TACは、設計書を最新の状態に保つこと、また重大な変化が生じ、プロジェクトの組織、スケジュールおよびコストの各要素が定義された場合、これらが与える影響を評価することを推奨する。
- 1.3.2 TEF-T建設費の評価手法が報告された。類似の高出力加速器のコストとの比較は、積み上げのコスト計算が現実的であることを示している。T-TACは、報告されたコストには予備費が含まれていないことについて留意する。物価上昇による問題を回避するため、外部公開にあたっては常にコスト評価の年を明示することを推奨する。

2. R&D 活動-1: LBE 核破碎ターゲット技術

2.1 IMMORTAL の計装と運転 - IMMORTAL の熱流動解析

- 2.1.1 T-TACは、【IMMORTALの】運用経験の蓄積を継続するよう推奨する。並行して、Pb-Bi系の化学的側面に焦点を当てたその先の運転の検討を開始せよ。独特の形状と配置を有するIMMORTALのターゲット容器は、ターゲット領域周りの腐食や質量移行を検討するのに有用だろう。IMMORTALシステムを用い、金属および非金属不純物の化学的管理に関する方法論を検討すべきである。
- 2.1.2 熱伝達係数と酸素濃度の【関係に関するデータ】取得を検討せよ。

2.2 高温腐食の研究およびフリーズバルブ開発

- 2.2.1 OLLOCHIによる腐食試験の条件は、TEF-TシステムとADSシステムの運転条件に基づいて

十分に検討すべきである。流動条件は、腐食および質量移行の挙動の観点から決定すべきである。質量移行に関するいくつかの無次元数は、平均流速と同じと考えるべきである。

2.2.2 フリーズバルブ周辺の応力を測定する実験は、フリーズバルブの実際の使用状況を模擬した条件で行うべきである。

2.2.3 中性子イメージングによる【LBEの】固化過程の測定は既に行われている。固化過程の観察には、歪みゲージ測定と組み合わせた固化中の中性子透過測定が直接的な情報を与えるであろう。そのような実験の実現可能性について議論すべきである。ブラッグエッジ透過手法による歪み測定の可能性についても、将来研究のための検討項目の一つであろう。

2.3 乱流 LBE 流れによる SUS316L の流動促進腐食 (FAC)

2.3.1 T-TACは、温度勾配が存在するより大きな領域に対する解析を行う事を推奨する。

2.4 LBE 中の不純物挙動

2.4.1 今後の仕事として、中性子照射により元素が生成するに伴う酸素ポテンシャルの変化は、評価すべきかも知れない。

2.4.2 T-TAC は、J-PARC を用いた核破砕生成物【の生成量】の実験的検証を強く支持する。

3. R&D 活動-2: 陽子ビーム関連研究

3.2 ADS および TEF 設計のための核破砕モデルの改良

3.2.1 低Z元素 (Be, B, ..., Na) の取量を増やすためのモデルの改良として、INCおよび蒸発過程において軽～中重同位体を放出する「フラグメンテーション」を導入せよ。

3.2.2 GEMに代わる蒸発モデルとして、PHITSへのABLA v. 7の導入を検討せよ。

3.2.3 核破砕生成物測定の実験を継続すべきである。γ線を放出しない同位体 (Cl-36, Fe-55, Fe-60 ...) に測定を拡張する必要性を評価せよ。

3.3 弾き出し断面積測定と陽子ビーム関連機器

3.3.1 さまざまな物理的原理 (ハープモニタ、発光材料塗布、熱電対) に基づくBPMを使用せよ。ある期間の照射後に発光材料の劣化が著しく明瞭な信号が得られないことが判明した場合、ハープモニタ、またはVIMOSのようなビームモニタを使用せよ。

3.3.2 センサ領域にわたって平坦なビームプロファイルは、陽子束の誤差を少なくする。

4 将来計画

4.3 ADS 開発のための材料研究活動

4.3.1 モデリング研究とTEF設計への要求との関係を明確にする必要がある。

4.3.2 材料研究活動のためのロードマップを作成する必要がある。

4.4 J-PARC における陽子照射施設概念

4.4.1 同種の既存施設や計画中の施設との比較により、新しいTEF施設の独自性を確保せよ。

Appendix I – 第5回 T-TAC アジェンダ

日程： 2019年2月14-15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

2月14日(木)

- 8:30 シャトルバス、ホテル発
- 9:20 ウェルカム (齊藤 直人)
- 9:25 T-TACの任務 (齊藤 直人)
- 9:35 概要
 - J-PARC概要 (齊藤 直人)
- 10:00 非公開セッション
- 10:35 サイトツアー
 - MLF (10:45-11:25)
 - LBEループ施設 (11:30-12:00)
- 12:00 昼食
- 13:00 写真撮影
- 13:10 概要 (継続)
 - J-PARCにおける核変換研究の概要 (二川 正敏)
- 13:30 TEF-Tの概要
 - LBEターゲットシステム (佐々 敏信, 35分)
 - ターゲットステーション、ビーム輸送および建家 (明午 伸一郎, 35分)
 - 技術設計書およびコスト評価 (前川 藤夫, 20分)
- 15:00 休憩
- 15:20 R&D活動-1 LBE核破砕ターゲット技術
 - IMMORTALの計装と運転 (大林 寛生, 25分)
 - IMMORTALの熱流動解析 (渡辺 奈央, 10分)
 - 高温腐食の研究およびフリーズバルブ開発 (斎藤 滋, 20分)
 - 乱流LBE流れによるSUS316Lの流動促進腐食 (FAC) (万 涛, 15分)
 - LBE中の不純物挙動 (大平 直也, 15分)
- 16:45 非公開セッション
- 17:15 解散、ホテルに向けシャトルバス発

2月15日（金）

- 8:30 シャトルバス、ホテル発
- 9:20 R&D活動-2 陽子ビーム関連研究
 - レーザ荷電変換による長パルス取り出し（武井 早憲, 10分）
 - ADSおよびTEF設計のための核破砕モデルの改良（岩元 大樹, 25分）
 - 弾き出し断面積測定および陽子ビームモニタ開発（明午 伸一郎, 25分）
- 10:20 将来計画
 - ADS開発のための材料研究活動（大久保 成彰, 15分）
 - J-PARCにおける陽子照射施設概念（前川 藤夫, 25分）
- 11:00 非公開セッション
- 12:00 昼食
- 13:00 非公開セッション
- 16:30 まとめの講演（議長）
- 16:50 結び（二川 正敏）
- 17:00 解散、ホテルに向けシャトルバス発

Appendix II – J-PARC による T-TAC 2018 の責務

齊藤 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 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および関連システムに関する、安全方針、運転およ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）

施設設計やR&D活動に関する通常の勧告に加え、T-TAC 2018では特に、TEF設計の完成度の評価、および更新されたTEF概念の方向性に対する助言を求める。

Appendix III - 2019 年の T-TAC 委員

氏名		所属
1	Marc SCHYNS	ベルギー原子力研究センター
2	Michael BUTZEK	ドイツ ユーリッヒ研究所
3	鬼柳 善明	名古屋大学工学研究科
4	近藤 正聡	東京工業大学先導原子力研究所
5	Georg MÜLLER	ドイツ カールスルーエ工科大学
6	坂本 慶司	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構
7	Michael WOHLMUTHER	スイス ポールシェラ-研究所