T-TAC 11 報告書

最終版

【　】内は訳注を示す。

1. 概　要

委員会は、当初 TEF-T 施設と TEF-P 施設に分割されていた以前の核変換実験施設（TEF）が、LBE【鉛ビスマス共晶合金】で冷却される加速器駆動システム（ADS）の開発に役立つ当初の範囲を超えて進化し、より多用途になるよう変更されたことを認識する。

範囲の変更は、直接的な産業応用を伴う他の様々なテーマに対応するものであり、現在は 4 つの主な方向性が含まれる。

1) ADS、J-PARC、核融合炉、核分裂炉のための大強度陽子・中性子場による材料照射
2) 医療用放射性同位体（RI）製造
3) 半導体デバイスのソフトエラー試験
4) 宇宙技術への陽子ビーム応用

こうして、照射後試験施設との組み合わせで陽子ビーム照射施設（PBIF）の概念設計改訂版が提案された。

提案されたプログラムは、ナトリウム冷却高速炉である常陽や水冷却の JRR-3 炉など、現在日本で改修または再稼働中の他の照射施設と強力な相乗効果をもたらすだろう。

施設の計画変更は、先進燃料の開発と TEF-P 施設の開発を暗黙的に延期することになる。

ADS ターゲット試験施設（TEF-T）は、特に LBE ターゲットの導入が以前の計画の中核であったが、加圧水冷却方式の新たな固体ターゲット概念の開発に変更された。LBE【ターゲット】の基準出力 250kW に対し、固体ターゲット（Ta 被覆 W 製）は 360kW（400MeV、0.9mA）の出力となる。本提案の主な理由は、より高い信頼性と可用性を確保し、ひいては産業界の本プロジェクトへの関与（主要エンドユーザーとしての産業界）を支援することである。

施設とその関連設計の計画変更が初期段階にあるため、明確なプロジェクト構造はまだ整っていないが、2 つの概念設計報告書が公開されており、これが提示された次のステップの基盤として役立てられ、資金獲得や産業界およびユーザーのコミュニティの発展に使われている。

2. 施設設計の更新

2.1. 陽子ビーム照射施設（PBIF）

所見

委員会は、日本の研究コミュニティと産業界を巻き込むために、とりわけ特化した研究会開催を通じて効果的な業務の流れを適用したことを高く評価する。このアプローチによりユーザーニーズが明確になり、提案された照射可能性への関心を高めた。

JAXA 資金【宇宙戦略基金】が確保された場合に、ロードマップにおいてソフトエラー照射施設計画が明確に強調された。この点において、JAXA の支援は施設実現のための戦略的かつ基盤的な要素であると認識される。提案されたソフトエラーのための陽子照射環境は、シングルイベント効果（SEE）研究に適した高い陽子ビームエネルギー（最大 400MeV）を有するため、特に放射線試験に魅力的である。

委員会はまた、中性子照射環境が地上レベルの応用に関連する SEE 試験に利用できる可能性があり、施設全体のコンセプトの汎用性をさらに高めることにも留意する。全体として、陽子照射概念のいくつかの技術的側面は、すでに十分に文書化されている。

固体ターゲットの提案は、STFC の ISIS【英国 Science and Technology Facilities Council の ISIS 中性子・ミュオン源】で適用されている既知の技術に基づいており、Ta で被覆された W 円盤を加圧水で冷却するものである。冷却水は 200 bar【20 MPa, ただし正しくは 2 MPa】に加圧され、流量は 1600 L/分、ターゲットへの圧力損失は 37 bar【3.7 MPa, ただし正しくは 0.37 MPa】である。

これは、ターゲットの設計に影響を与え、強い熱負荷と機械的負荷、および円盤上の強い流れ誘起の振動が発生する。

コメント

- 委員会は、予定されている JAXA 照射施設と提案されている陽子ビーム照射施設（PBIF）とのインターフェースについて、文書化による更なる明確化が有益であると考える。特に、既存の JAXA 照射施設への影響の範囲や PBIF ビームラインの相対的な配置を含め、両施設間の想定される相互作用のレベルについて更なる明確化を行うことは、提案されている配置に関する全体的な理解を深めるのに役立つだろう。
- ビーム供給計画についても、更なる明確化が求められる。特に、低エネルギーおよび高エネルギーの陽子ビームを既存の宇宙照射施設にどのように輸送するのか、あるいはこれらのビームを独立したテストスタンドで利用することを想定しているのかについての説明が有益である。運用時の配置を明確に説明することは、実現可能性と柔軟性をより適切に評価する上で役立つ。
- 中性子照射環境については、施設で達成可能な中性子スペクトルと、LANSCE、CHIPIR、RCNP【それぞれ、米国、英国、阪大の中性子照射施設】などで利用可能なソフトエラー試験に用いられる標準大気中性子基準スペクトル（例：JESD89【Global Standards for the Microelectronics Industry が定めるソフトエラー率試験法】）との定量的な比較を示すことを委員会は推奨する。この比較は、確立された国際ベンチマークに対する施設の位置付けを強化するものである。プログラム的な観点から、委員会は照射施設開発のロードマップと照

射後試験のためのホットラボ開発のロードマップを一体化しないよう勧告する。これら基盤施設間の緊密な調整は必要であるが、ホットラボは PBIF と排他的に連携しているのではなく、複数の施設にサービスを提供する J-PARC の共有財産であるように思われる。この2つのロードマップを明確に分離することで、読みやすさと戦略的な一貫性が向上するだろう。

- 委員会はさらに、既存の協力関係を基盤としつつ、国際的なユーザーとの新たなパートナーシップを促進することにより、陽子線および中性子線照射施設による SEE 試験の国際化を積極的に推進することを奨励する。
- 委員会は、確立または実証された設計概念に基づく要素とさらなる技術開発を必要とする要素を区別するため、詳細な技術成熟度レベル（TRL）表の提供を提案する。建設前にリスクを低減するため、後者は専用の成熟した計画によって支援される。
- 委員会は、施設全体が同時に実現できないシナリオに対応した、体系的な緊急時対応計画を提示することを推奨する。特に、ホットラボ、中性子照射施設、特定の陽子エネルギー範囲（例：低エネルギービーム）といった主要構成要素の欠如または遅延に伴うリスクと運用上の制約を特定することは有益である。これにより、より堅牢で透明性の高い施設開発戦略が支持されるだろう。
- 委員会は、固体ターゲット設計の安全性評価の基準シナリオとして、流量喪失事故（LOFA）または冷却材喪失事故（LOCA）を検討することを推奨する。全所停電時は本シナリオに加えビームも失われるため、あまり重要ではない。
- 固体ターゲット設計の成熟度はまだ証明されておらず、ターゲットに対して LBE、水銀および水冷却技術の全てを考慮した工学的検討オプションを提案する。

2.2 照射後試験のためのホットラボ

所見

委員会は、陽子ビーム照射施設（PBIF）の定められた目的と用途を考慮すると、J-PARC で提案されている照射後試験（PIE）施設の範囲は比較的広範である点を指摘する。現状の説明に基づくと、想定されている PIE 機能のすべてが PBIF の利用形態を支援するために必要かどうかは完全には明確ではない。

陽子ビーム照射施設に関する報告で「J-PARC は MLF【物質・生命科学実験施設】だけでなく、他のニュートリノおよびハドロン実験施設のためにも PIE のためのホットラボを必要としている。」と示されたように、ホットラボは複数の J-PARC 施設にサービスを提供する共有インフラとして想定されており、その能力のごく一部のみが PBIF 活動に実際に割り当てられる。この文脈において、委員会は PIE 施設と PBIF プロジェクトの連携について、更なる明確化が有益であると考える。

さらに、ホットラボの目的の中で、LBE ターゲットから得られるサンプルを収容する能力も依然として検討されている。ホットセルの適用範囲が広く、利用可能な容量が限られていることを考慮すると、この目的がホットラボにとって依然として必要かどうかを明確にすることを推奨する。

コメント

- 特に、ホットラボが正式に PBIF プロジェクト範囲の一部なのか、それとも PBIF が部分的に利用することとなる独立した J-PARC 施設なのかをより明確に区別することを推奨する。委員会の観点からは、これら 2 つの側面を明確に区別することで、透明性と戦略的な焦点が向上すると考えられる。

2.3 医療用同位体

所見

医療用同位体の製造は、PBIF および PIE 施設においてさらに発展・統合されるべき 4 つのトピックの一つとして提示された。2025 年 10 月には、産業界のパートナーと 100 名以上の参加者が参加する専用ワークショップが開催された。施設の【建設】承認日から 10 年目に医療用同位体の製造を開始するロードマップが提示された。

核医学で使用される 2 つの放射性核種が取り上げられ、研究開発の成熟度が非常に低い 3 つ目の核種も示された。Mo-99 は、SPECT【単光子放出コンピューター断層撮影】イメージングの放射性医薬品トレーサーとして最も多く使用されている Tc-99m 放射性核種のジェネレータとして使用される。Ac-225 は標的アルファ線治療のための新興放射性核種であり、臨床試験の研究に使用され、この新興治療分野で大きな市場シェアを獲得すると期待される。Tb-149 は PET【陽電子放出断層撮影】イメージングと標的アルファ線治療の両方の特性を兼ね備えており、研究開発の非常に初期段階にある。

ブルックヘブン国立研究所（米国）の BLIP【Brookhaven Linac Isotope Producer】施設に着想を得たターゲットとステーション配置が紹介されるとともに、CERN【欧州原子核研究機構】の同位体質量分離法を用いて Tb-149 新興アルファ線核種を生成する方法が示された。ターゲット照射場は、LBE ターゲットの上流に計画されている。照射済みトリウムターゲットから Ac-225 を分離するための放射化学プロセスが示され、その純度と収率はプロセスに依存する。

様々な加速器材料について、【核種】生成断面積の測定と計算が行われた。Mo-99 の生産では、直接陽子照射または高速中性子による放射化といった、様々な生成経路と照射ステーションの配置が検討された。いくつかの配置について、断面積が測定された。これにより、JRR-3 の Mo-99 生産能力を補完し、Mo-99 の国内生産を可能にする、補完的かつ重要な生産能力が実現する。

コメント

- 日本における医療用同位体の製造は、原子炉、大学のサイクロトロンなどの加速器、そして理化学研究所のイオン加速器施設などの加速器センターのネットワークを通じて進められている。PBIF 施設を日本の医療用同位体製造分野において最適な位置づけとするためには、これら様々なセンターとの連携を追求する必要がある。
- 医療用同位体のニーズは急速に変化しており、治療分野で利用される新興放射性核種は 10 年の期間で出現している。例えば、新興が見込まれる Ac-225 はまもなく成熟段階に達する可能性があり、Tb-161 は既に欧州で出現しており、At-211 は次なる治療候補となる可

能性がある。これらの放射性核種は、当施設の事業範囲には現時点では含まれていない。したがって、医療用同位体の製造については、対象核種を少し拡充することを検討する必要がある。

- PBIF における医療用同位体製造の多用途性と独自の可能性を最大限に引き出すためには、資金が確保できれば、3 つの要素、すなわち直接陽子照射場、高速中性子照射場、そしてオフライン同位体分離装置を統合・維持する必要がある。これら 3 つの要素を組み合わせることで、PBIF は競争力を高めることができるが、段階的な運用と適度な追加費用が発生する。施設配置においては、スペースの確保を適切に考慮する必要がある。
- プロジェクトチームは、研究用放射性核種（技術成熟度レベル TRL が低い）、あるいは産業用供給【放射性核種】（TRL が高い）であるかを追跡調査する必要がある。これは、GMP【Good Manufacturing Practice：適正製造規範】制約などの施設配置や、一定かつ保証された供給スケジュールなどの関連する運転モードに大きな影響を与えるためである。

2.4 宇宙戦略基金への応募

所見

委員会は、JAXA に提出された提案が宇宙戦略基金の目的に非常に合致していることを認め、要求された資金が確保されることを期待する。提案された研究範囲は、日本の宇宙コミュニティにとって非常に重要であり、特に低リスク・低コストの宇宙ミッション（典型的には低地球周回軌道（LEO）だが、これに限定されるわけではない）における、陽子照射ビームタイムへのアクセス拡大という認識されているニーズに直接対応するものである。

この施設は、この公募の 2 つの主な目標とよく一致している。
(1) ビームタイムの可用性を高めることでスケジュールとコスト削減
(2) 公募で定義された技術基準を満たす放射線試験施設の提供

200 MeV を超えるエネルギーを含む高エネルギー陽子ビームの利用可能性は、大きな強みと考えられる。リニアックトンネル内に施設を建設するという提案は、適切かつ経済的に実現可能な解決策であると考えられる。可能なビーム運転モードは概ね十分に説明されており、全体的なビームパラメータ（陽子束、ビーム寸法）は、同等の国際施設の範囲内である。

委員会はさらに、広い範囲の陽子エネルギーを提供することへの関心も認識している。特に、100 MeV を超えるエネルギーは、SEE 試験における飽和断面積測定に非常に重要であると認識されている。エネルギーの広がり効果を適切に把握するための適切なシミュレーションとベンチマークデータが利用可能であれば、より低いエネルギー範囲も、特に機器の校正や変位損傷の研究に有用となる可能性がある。

コメント

- 委員会は、本提案が宇宙戦略基金の目的と強く整合していることを踏まえ、ビーム利用モードの優先順位をより明確にすることで、運用概念の実現に寄与すると考える。特に委員会は、実効ビームタイムを最大化し、ユーザーのスケジュール管理の柔軟性を高めるため、並行ビーム利用方式に重点を置くことを推奨する。

- 同時に委員会は、並行利用時における寄生運転により施設へのアクセスに制約が生じ、物理的なアクセスが週 1 回に制限される可能性があることを指摘する。このようなアクセス条件は既存の施設（例：CHARM【電子機器への放射線影響試験のための CERN の施設】）と同等だが、委員会は PBIF が依然として一度に 1 人のユーザーのみを収容するビーム施設として運用されることを指摘する。この文脈において、高い運用効率の達成が不可欠である。
- この目的を支援するため、委員会は施設運用と利用者対応における高度な自動化の早期導入を強く推奨する。この側面は極めて重要であり、建設後に効率的に導入することはできないため、設計・計画段階で取り組む必要がある。
- ビームエネルギー範囲に関して委員会は、低エネルギー陽子ビームへの科学的関心は認識しているものの、複数エネルギーでの並行運転が過度に複雑になる場合は、飽和断面積条件下での SEE 試験で最も一般的に使用される高エネルギービーム（100 MeV 超）を優先することを提案する。低エネルギービームは特定の用途においては依然として関心の対象となり得るが、その導入は、特に並行利用のシナリオにおいては、運転の複雑さと比較して検討されるべきである。委員会は、この制限はビームの排他的利用時には適用されないことに留意する。
- 委員会は、PBIF のその後の【宇宙戦略基金事業後の】開発・建設において、インフラが撤去されずに維持される仕組みを明確にすることを勧告する。インフラの継続性は、提案の堅牢性と実現可能性をさらに高めるだろう。

3. 研究開発活動

3.1. 鉛ビスマス技術開発

所見

委員会は、鉛ビスマス技術チームの豊富な知識とスキルを評価する。LBE ターゲットは、プロトタイプの設計、構築、運用に十分な成熟度を備えていると思われる。
JAEA は、計測機器、腐食研究（流動 LBE 中の腐食は管理可能であり、このような技術の採用を脅かすものではない）、不純物の管理、制御、運転などの技術を習得している。

コメント

- 委員会は、LBE ターゲットを PBIF のオプションとして考慮し、LBE 技術の最先端設備である OLLOCHI および IMMORTAL ループでの活動をさらに実施することを提案する。
- ターゲットの遠隔操作と保守に関連する問題は、高温運転による可用性と信頼性の課題が増加する可能性があるが、LBE ターゲットオプションの障害とは考えられていない。

3.2. ADS 用超伝導線形加速器の設計とスポーク空洞の試作

所見

空間電荷補償の蓄積によって引き起こされる過渡的なビーム寸法によるビーム損失が数値的に調べられ、損失が 1 W/m の許容限度以下であることが示された。

過渡チョッパー場におけるパルス終端のビームダイナミクスも数値的に検討され、ビームテールが十分短く原子炉の未臨界度の測定要件を満たすことが示された。

T-TAC10 コメント対応として、ビーム出力を定格値まで増加させる手順が原子炉チームと議論され、原子炉構造への熱応力を回避するとともにビーム窓の健全性を確保するため、定格ピークビーム電流と 50 Hz の繰り返し周波数を維持しながら、パルス長を 100 秒ごとに 0.5%増加するように定義された。

加速器調整のためのビーム運転戦略が提案された。この戦略では、定格ピークビーム電流を維持しながら、パルス長と繰り返し周波数によってビーム出力が調整される。

T-TAC10 コメント対応として、超伝導リニアックを使用している他の施設と協力し、ビームトリップ後の迅速なビーム回復方法の開発が進められている。

フルスケール ADS リニアック（1.5 GeV、20 mA）に向けたステップとして、縮小スケールリニアック（1 GeV、10 mA）が提案された。

T-TAC10 の勧告に基づき、縮小スケールリニアックの設計報告書が完成し、現在印刷中である。また、フルスケールの ADS リニアックの設計報告書が執筆中である。

T-TAC10 の勧告に基づき、スポーク空洞試作機の製作を継続している。2024 年度には組立・溶接を実施し、2025 年度には緩衝化学研磨を実施した。2026 年 2 月には真空熱処理を実施する予定である。

コメント

- T-TAC10 のコメントと勧告に対し、適切な対応がなされた。
- 委員会は、チョッパーによって引き起こされるビームの過渡的挙動によるビーム損失とビームテール長を評価するための徹底的な数値解析が実施されたことを高く評価する。委員会は、数値解析手法の検証のため、他の施設における実験との比較を推奨する。
- 委員会は、ビーム出力増強における原子炉側との整合性が適切に考慮されていると認める。
- ビーム運転戦略について懸念がある。ビーム調整の初期段階においても定格ピークビーム電流を維持することが提案されている。これは、超伝導空洞の調整プロセスにおいてピークビーム電流を可能な限り低く抑える他の施設の手法とは大きく異なる。
- 委員会は、スポーク空洞試作機の製作が着実に進んでいることを認める。

3.3. 中性子工学実験

所見

当初計画されていた TEF-P 臨界集合体の建設は、現在の計画から削除された。主な理由は、臨界集合体に使用する予定だった核燃料が米国に返還されたためである。この決定により、ADS 研究のための核データの精度向上に必要な積分実験が実施できなくなり、ADS 研究の遅延を招く。

新たに利用可能になった人工知能（AI）支援型数値モデリングを用いた、様々な断面積データの決定と外挿について報告された。本研究は、加速器の主要材料元素に対する様々な新しい励起関数の決定へと進展した。

コメント

- 明らかな進歩が示されたが、核データは濃縮ターゲットで決定しなければならないことが多く、天然元素のデータからどの程度まで濃縮ターゲット【のデータ】を完成できるかが報告では明らかではなかった。
- 測定済みデータは、J-PARC 技術報告書としての予定されている範囲を超えて公開される必要がある。
- ADS に必要な中性子核データに関する議論において、微分核データは十分な精度を有しているものの、積分核データの精度は依然として不十分であることが報告された。当初計画に含まれていた TEF-P 施設は、この目的のための積分実験を行うことを目的としていた。したがって、TEF-P なしで積分データの精度をどのように向上するかを明確に示す必要がある。

4. 結言

- 委員会は、J-PARC により 2 つの概念設計報告書としてまとめられた PBIF およびホットラボ施設概念設計作業の高い価値と、研究施設の市場投入までの時間を短縮し、エンドユーザーとして産業界を関与させることができる方向に進む必要性を認識する。
- 委員会は、人員、資源、予算の状況が適切に示されず、明確なロードマップも部分的にしか報告されていないため、当該目標の達成状況についてフィードバックを提供することができない。
- 委員会は、ADS 試験、医療用放射性核種製造、SEE 電子機器試験に関して、予定されている PBIF のいくつかの独自の特徴を認識する。
- 委員会は、PBIF と PIE ラボのロードマップを分離し、資金調達の進捗状況に応じて 4 つの領域に対応できる様々な段階を定義することを推奨する。
- 委員会は、プロジェクトを遂行するために、いくつかの関連ブロック（ターゲットおよびホットラボなど）に関するオプションエンジニアリング【設計の初期段階で、様々な可能性（オプション）を意図的に検討し、製品の性能や効率を最適化するプロセス】研究を組み合わせた早期のビジネスプラン策定を提案する。
- 宇宙応用のための JAXA 宇宙戦略基金による照射サービスを中心に、短期的に目に見える効果をもたらす可能性を示しつつ、長期的開発への対応に必要な柔軟性も維持している。短期的な有用性と将来の拡張性のバランスが、改訂された概念の重要な強みと考えられ

る。特定された 4 つの応用分野の中で、ソフトエラー（SEE）試験用の陽子ビーム照射施設は、成熟度において際立っている。

- 施設の運用シナリオ、そして JAXA が資金提供する部分が施設全体の構成要素として機能する、その後の段階の PBIF の開発を詳しく説明することを強く推奨する。また、潜在的な産業界の利害関係者にサービスを提供し、施設を最適な方法で活用するための適合性を検討せよ。
- 医療用 RI 製造では、陽子照射、中性子照射、質量分離の個別のモジュールの実装を詳しく説明すべきである。
- ディビジョンの限られた資源を適切に再配分するため、LBE または固体ターゲットの開発に関する工学的判断を体系化する必要がある。

付録

T-TAC の任務

主に次に掲げる事項について助言すること。

• 陽子ビーム照射施設の目的、つまり多様なニーズに応える陽子ビーム利用を達成するための施設概念の妥当性

および

• 上記主目的のための、ADS 開発のための大強度の加速器、陽子ビームおよびターゲット技術に関する研究開発活動の方向性と技術的側面

上記任務で示された通例の要求に加え

• 今年の T-TAC では特に陽子ビーム照射施設の設計開発手順について助言することを求める。

T-TAC 委員メンバー

2024-2026 年度の T-TAC 委員メンバー（更新）

氏名	所属	専門分野
Thierry STORA (議長)	CERN	RI 製造、鉛ビスマス技術
Mariano TARANTINO（新）	ENEA	鉛ビスマス技術
Salvatore DANZECA（新）	CERN	ソフトエラー
羽場 宏光（新）	理化学研究所	RI 製造 （欠席）
片渕 竜也（新）	東京科学大学	中性子工学 （初日のみ）
増田 開（新）	量子科学技術研究開発機構	加速器