

**第 6 回核変換実験施設 (TEF)
テクニカルアドバイザー委員会**

2020 年 2 月 6-7 日
J-PARC センター 東海村 日本

T-TAC 2019 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. ターゲット技術開発【セクション】の R&D 活動と将来計画	5
1.1 遠隔操作技術	5
1.2 酸素ポテンシャル測定と制御	6
1.3 電磁流速計開発	6
1.4 LBE 中の鋼材の腐食挙動に対する照射の影響	7
1.5 LBE 技術の将来の R&D	7
2. 施設利用開発【セクション】の R&D 活動と将来計画	8
2.1 ADS 用超伝導 LINAC のための R&D	8
2.2 加速器信頼性の研究	8
2.3 ADS 実現に向けた J-PARC における中性子工学実験	9
2.4 J-PARC ADS ターゲット試験施設のための R&D	10
3. T-TAC のまとめ	11
本報告のセクション毎の勧告のまとめ	12
付録 I - 第 6 回 T-TAC 会合アジェンダ	14
付録 II - J-PARC による T-TAC 2019 の責務	16
付録 III - T-TAC 2019 委員名簿	17

要 旨

2020年2月6-7日、東海村のJ-PARCにて核変換実験施設（TEF）計画の第6回技術諮問委員会 T-TAC が開催され、高温特研の鉛ビスマスループとともにニュートリノ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 2019 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、日本の ADS プログラムのために J-PARC が他の組織と協力していることを認識しており、その発展を奨励する。

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、現在進められている活動の一部がより基本的な R&D 活動に焦点が絞られているという事実懸念を感じる。設計側に関連データを提供するための既存の基盤設備の利用したデータ取得を進めるための人員確保のため、大学との協力を検討すべきであろう。

今回の T-TAC 会合では特別に要請されたため、2028 年までの「核変換ディビジョン」の将来計画のレビューを行った。T-TAC は、ターゲット技術開発によって得られる成果と照射施設の設計作業のニーズとの整合性に特に注意を払うことを条件に、この計画が実行可能であると考え

る。最後に T-TAC は、「照射施設」の安全性評価の計画が示されなかった点に言及する。より良い勧告のため、T-TAC は、次の会合において ADS 開発の全体計画の概要を報告することを推奨する。

はじめに

2020年2月6-7日、東海村のJ-PARCにて核変換実験施設(TEF)計画の第6回技術諮問委員会 T-TAC が開催され、高温特研の鉛ビスマスループとともにニュートリノ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。参加出来なかった Michael WOHLMUTHER 氏(PSI)を除き、委員会メンバー全員(付録 III)が2日間の会合に参加した。

T-TAC は、手厚いもてなしと優れた会合運営を提供してくれた J-PARC/JAEA に感謝する。前回 T-TAC のコメントと勧告への対応について会合の中で示してくれた報告者の努力に大変感謝する。

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. ターゲット技術開発【セクション】の R&D 活動と将来計画

1.1 遠隔操作技術

所見

- T-TAC は、T-TAC 2018 の大部分の勧告について適切に取り組みられていると認める。
- ターゲット容器交換の遠隔操作技術に関する R&D について報告された。遠隔操作のための配管切断機器および TIG 溶接機が開発された。内部欠陥検出のためのオンライン検査手法についても説明された。製造メーカーの仕様によれば、選定された X 線検出カメラは線量率 50 Gy/h の放射線環境においても測定可能である。

コメント

- 溶接前の LBE の洗浄仕様と技術について示されていない。前述のように、配管内面の LBE は溶接部に望ましくない合金化をもたらし、溶接部の品質を低下させる可能性がある。
- これまで、溶接品質に関する情報が提供されたことがない。

勧告

- 1.1.1. モータおよび機器の照射に敏感な部品の耐放射線性を考慮せよ。
- 1.1.2. TIG 溶接に必要なすべての手順を明確にせよ（予熱、溶接後熱処理（PWHT）、検査、漏洩検査）。
- 1.1.3. 遠隔操作システムの故障モードを特定し、検討せよ（例えば、遠隔操作による救援操作が不可能な位置でのモータの固着）。
- 1.1.4. PWR に適用される溶接検査の規則や基準に準拠することを確認せよ。

1.2 酸素ポテンシャル測定と制御

所見

- 開発された自動酸素制御システムは、OLLOCHI および IMMORTAL ループに実装された。耐熱衝撃性を改善するためにチームは、自動車産業向けに製造された製品に基づく薄板積層型（LTP）酸素センサの開発を新たに開始した。これまでに得られた初期の結果は有望である。

コメント

- 新型 LTP センサの有効面積の減少は、局所的な酸素濃度の測定に有効である。
- 新型センサの長さが非常に短いことは、LBE 深部での測定（もし必要な場合）には不利であろう。ただし、さらなる開発によりこの状況を克服できる。
- 新型 LTP センサの【優れた】耐衝撃性は想定されているものの、まだ実証されていない。

勧告

- 1.2.1 最大の加熱／冷却率を定量的に評価できるように、特化した実験により改善された耐衝撃性を評価しなければならない。

1.3 電磁流速計開発

所見

- 電磁流速計開発に関する研究が紹介された。液体金属中における電磁流速計の性能に関する予備的な結果が説明された。

コメント

- 流速と流れの方向を測定するために、既存の 2 電極に加え、電極を追加することを検討せよ。

勧告

- 1.3.1 CFD コードの結果を検証するための貴重なデータを取得するために、流速計によって引き起こされる流れの摂動が十分に小さいことを確認せよ。
- 1.3.2 電極の腐食と形状安定性を評価すべきである。
- 1.3.3 液体金属の温度がセンサー出力に与える影響（金属抵抗率と透磁率）を評価せよ。

1.4 LBE 中の鋼材の腐食挙動に対する照射の影響

所見

- LBE 中の鋼材の腐食挙動に対する照射の影響に関する最初の結果は、イオン照射およびその後の LBE 中での腐食試験が行われた試験片により得られた。照射後、【LBE への】暴露の初期状態で酸化の促進が観察された。

コメント

- 腐食挙動に対する核破砕生成物の影響を研究するために、開始した研究は極めて重要である。今のところ利用可能なデータが限られているため、本研究の展開は大きく評価できる。

勧告

- 1.4.1 照射後の酸化の促進が初期状態に限定されているかどうかを確認するため、より長時間 (> 1000 時間) の【LBE への】暴露を行う追加の実験を行うべきである。

1.5 LBE 技術の将来の R&D

所見

- T-TAC は、将来の R&D 計画において、遠隔ターゲット交換技術に関する活動が中断されると認識した。

コメント

- T-TAC は、遠隔操作に関する活動は TEF 施設設計にとって重要な知見であると考えられる。

勧告

- 1.5.1 施設設計を仕上げるための必要最小限の知見を提供するため、遠隔操作関連活動の計画を再検討せよ。
- 1.5.2 照射施設建設に向けた安全性評価書を更新するため、必要な R&D 結果を提供せよ。

2. 施設利用開発【セクション】の R&D 活動と将来計画

2.1 ADS 用超伝導 LINAC のための R&D

所見

- 超伝導 Linac の採用により、JAEA-ADS Linac の基本設計が再検討された。概念設計が完了し、R&D 計画が提示された。
- 提示された空洞試作の期間はかなり長い。報告で述べられたとおり、限られた予算と人材のために期間を短縮することはできない。

コメント

- 超伝導空洞 (SC) の設計は従来型である。しかし、この概念は JAEA-ADS の仕様 (完全な CW 運転、高電流、高信頼性および高稼働率) を考慮すると合理的である。
- KEK との協力の下で SC 試験を進める R&D 計画は、投資コストと人的資源を節約できるので適切である。

勧告

なし。

2.2 加速器信頼性の研究

所見

- J-PARC【加速器】の運転経験と信頼性が報告された。これは非常に重要で興味深い研究である。信頼性は時間とともに向上することが明確に示された。

コメント

- ADS の場合のビームトリップ条件は、報告された条件よりも厳しい場合があることに留意してください。つまり、被覆材は LBE と接触するとともに放射線環境に置かれるため、放射線および LBE との接触を考慮した適切な材料特性データを使用する必要がある。これらの関連する特性の値は、通常状態の材料特性と比較して異なる。

勧告

- 2.2.1 T-TAC は、各年の異なる電流値、デューティサイクル等における信頼性データを整理することを推奨する。今回提案されたデータ分析手法を改良することにより、さらに興味深い知見が得られることが期待される。

2.3 ADS 実現に向けた J-PARC における中性子工学実験

所見

- T-TAC は、核反応断面積測定において大きな進捗があったと認識する。核種生成断面積と弾き出し断面積がうまく測定され、新しい重要なデータが得られた。核種生成断面積の結果は、計算と実験の間に大きな不一致があることを示した。二重微分断面積、厚いターゲットからの中性子収量、非弾性散乱断面積の測定計画が紹介された。

コメント

- 測定された核種生成断面積のデータは、2 元素のみではあるが、それらデータの有用性とシミュレーション計算コード改善の必要性を明確に示している。今後の計画では、ADS だけでなく、J-PARC【MLF】第 2 ターゲットステーションなどの他の多くの核破碎中性子源についても有用なデータが得られることが期待される。T-TAC は、この種の核データ測定を進める取り組みを認める。

勧告

- 2.3.1 核種生成断面測定では、核反応モデル改善のために単一同位体元素についても測定する必要がある、また原子核理論家との緊密な協力が推奨される。
- 2.3.2 実験計画は、利用可能な資源を考えれば野心的である。ADS ニーズへの焦点を保ちつつ、国際的協力を展開することをチームに推奨する。

2.4 J-PARC ADS ターゲット試験施設のための R&D

所見

- 多くのシステム（衛星、アビオニクス、自動車、電車、通信システムなど）は、増え続ける数の電子部品をより複雑に統合しつづけており、【半導体の】ソフトエラーは【それらシステムの】重大な損傷を引き起こす可能性がある。従って、J-PARC が建設を目指している加速器【施設】において、ソフトエラー試験は確実なビジネスケースになり得る可能性がある。

コメント

- T-TAC は、ソフトエラー試験のような中性子源の新しい商用応用を探索する努力を認める。ただし、ADS【の研究開発】は、この機会をうまく活用する必要がある。
- 様々なビームモニタが評価されており、将来利用可能になるであろう。T-TAC は、この【活動の】継続を推奨する。

勧告

- 2.4.1 どうすれば中性子施設が ADS 計画にとって有用なものになるか、可能性を検討せよ。一例として、中性子源に LBE ターゲットを使用することを検討せよ。

3. T-TAC のまとめ

T-TAC は、TEF チームによってなされた進捗を祝福し、TEF 計画に対するチーム関係者による深い関与を認めるとともに、チームが 2019 年の 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、日本の ADS プログラムのために J-PARC が他の組織と協力していることを認識しており、その発展を奨励する。

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、現在進められている活動の一部がより基本的な R&D 活動に焦点が絞られ、さらに遠隔ターゲット交換の開発が中断されるという事実懸念を感じる。「核変換ディビジョン」の将来計画で示されたように 2024 年に照射施設の建設を開始するのであれば、設計側のニーズに適切に焦点を当てる必要がある。より基本的な R&D 活動に取り組むために、大学との協力を検討することも考えられる。こうすることにより、設計側に関連データを提供するための既存の基盤設備の利用したデータ取得を進めるための人員を確保できる。

今回の T-TAC 会合では特別に要請されたため、2028 年までの「核変換ディビジョン」の将来計画のレビューを行った（以下の図 1 参照）。T-TAC は、十分な資源が利用可能であれば、この計画は実現可能であると考えます。ただし、本計画において、「ターゲット技術」(2-c) 開発で得られる成果と「照射施設」(1) の設計作業のニーズとの整合性に特に注意を払うべきである。T-TAC は、「加速器」(2-a) と「ビーム技術」(2-b) の計画は、どちらも 2028 年に ADS 加速器の設計を開始するレベルに達すると確信する。T-TAC は、「ターゲット技術」(2-c) の R&D 計画が 2028 年に ADS の概念設計支援【開始可能なレベル】に十分に進捗可能であると認める。

最後に T-TAC は、「照射施設」の安全性評価および「ADS システム」の計画が示されなかった点に言及する。より良い勧告のため、T-TAC は、次の会合において ADS 開発の全体計画の概要を報告することを推奨する。

JFY	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
1. Irradiation facility	Conceptual design			Detailed design		Construction				
2-a. Accelerator	Conceptual design			Study for improving reliability						
	Prototyping of a SC cavity			Prototyping of low-β section, power control tech.						
2-b. Beam tech.				beam monitor and beam flattening tech.						
	Nuclear data measurement			shielding expt.		MA fission measurement with an LBE target				
2-c. Target tech.	Oxygen control in LBE, thermal-hydraulics, instrumentation, impurity						Target module test			
	Irradiation test (STIP) @PSI, corrosion test with OLLOCHI									
JAEA's mid- to long-term plan	3rd (2015-2021)			4th (2022-2028)						

Completion of R&D necessary for designing a demonstrative ADS (2-3 MWb, 1.0 GeV, 100 MWt), defined by the PSI program

図 1: 核変換ディビジョンの将来計画

(出典: T-TAC 6, Overview of the Nuclear Transmutation Division, 12 ページ)

本報告のセクション毎の勧告のまとめ

1. ターゲット技術開発【セクション】の R&D 活動と将来計画

1.1. 遠隔操作技術

- 1.1.1. モータおよび機器の照射に敏感な部品の耐放射線性を考慮せよ。
- 1.1.2. TIG 溶接に必要なすべての手順を明確にせよ（予熱、溶接後熱処理（PWHT）、検査、漏洩検査）。
- 1.1.3. 遠隔操作システムの故障モードを特定し、検討せよ（例えば、遠隔操作による救援操作が不可能な位置でのモータの固着）。
- 1.1.4. PWR に適用される溶接検査の規則や基準に準拠することを確認せよ。

1.2. 酸素ポテンシャル測定と制御

- 1.2.1. 最大の加熱／冷却率を定量的に評価できるように、特化した実験により改善された耐衝撃性を評価しなければならない。

1.3. 電磁流速計開発

- 1.3.1. CFD コードの結果を検証するための貴重なデータを取得するために、流速計によって引き起こされる流れの摂動が十分に小さいことを確認せよ。
- 1.3.2. 電極の腐食と形状安定性を評価すべきである。
- 1.3.3. 液体金属の温度がセンサー出力に与える影響（金属抵抗率と透磁率）を評価せよ。

1.4. LBE 中の鋼材の腐食挙動に対する照射の影響

- 1.4.1. 照射後の酸化の促進が初期状態に限定されているかどうかを確認するため、より長時間（> 1000 時間）の【LBE への】暴露を行う追加の実験を行うべきである。

1.5. LBE 技術の将来の R&D

- 1.5.1. 施設設計を仕上げるための必要最小限の知見を提供するため、遠隔操作関連活動の計画を再検討せよ。
- 1.5.2. 照射施設建設に向けた安全性評価書を更新するため、必要な R&D 結果を提供せよ。

2. 施設利用開発【セクション】の R&D 活動と将来計画

2.1. ADS 用超伝導 LINAC のための R&D

なし

2.2. 加速器信頼性の研究

- 2.2.1. T-TAC は、各年の異なる電流値、デューティサイクル等における信頼性データを整理することを推奨する。今回提案されたデータ分析手法を改良することにより、さらに興味深い知見が得られることが期待される。

2.3. ADS 実現に向けた J-PARC における中性子工学実験

- 2.3.1. 核種生成断面測定では、核反応モデル改善のために単一同位体元素についても測定する必要がある、また原子核理論家との緊密な協力が推奨される。
- 2.3.2. 実験計画は、利用可能な資源を考えれば野心的である。ADS ニーズへの焦点を保ちつつ、国際的協力を展開することをチームに推奨する。

2.4. J-PARC ADS ターゲット試験施設のための R&D

- 2.4.1. どうすれば中性子施設が ADS 計画にとって有用なものになるか、可能性を検討せよ。一例として、中性子源に LBE ターゲットを使用することを検討せよ。

付録I- 第6回 T-TAC 会合アジェンダ

日付: 2020年2月6-7日

場所: 原子力機構 東海J-PARC 研究棟2階大会議室

2020年2月6日(木)

- 8:20 シャトルバス ホテル発
- 9:30 ウェルカム (齊藤 直人)
- T-TAC の任務 (齊藤 直人)
- J-PARC 概要 (齊藤 直人)
- 10:10 写真撮影
- 10:30 非公開セッション
- 10:50 概要
- 核変換ディビジョン概要 (二川 正敏 & 前川 藤夫)
- 11:20 ターゲット技術開発セクションの R&D 活動と将来計画
- 遠隔操作技術 (斎藤 滋)
 - 酸素ポテンシャル測定と制御 (大林 寛生)
 - 電磁流速計開発 (有吉 玄)
- 12:20 昼食
- 13:30 ターゲット技術開発セクションの R&D 活動と将来計画
- LBE 中の鋼材の腐食挙動に対する照射の影響 (大久保 成彰)
 - LBE 技術の将来の R&D (佐々 敏信)
- 14:30 休憩

15:00 施設利用開発セクションの R&D 活動と将来計画

- ADS 用超伝導 LINAC のための R&D (近藤 恭弘)
- 加速器信頼性の研究 (武井 早憲)
- ADS 実現に向けた J-PARC における中性子工学実験 (松田 洋樹)
- J-PARC ADS ターゲット試験施設のための R&D (明午 伸一郎)

17:00 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

19:00 デイナー

2020 年 2 月 7 日 (金)

8:20 シャトルバス ホテル発

9:30 サイトツアー (ニュートリノ実験施設, LBE ループ)

10:30 休憩

10:40 非公開セッション

12:00 昼食

13:00 非公開セッション

16:00 まとめ

16:20 結び

16:30 解散、ホテルに向けシャトルバス発

付録 II - J-PARC による T-TAC 2019 の責務

齊藤 直人

T-TAC の任務 (Mission)

主に次に掲げる責務について助言すること:

- 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）

ここで、“TEF”とは過去に設計された TEF-T および TEF-P からなる核変換実験施設ではなく、**見直された TEF 概念**のことを指す。

T-TAC 2019 の責務 (Charge)

任務で示された通例の要求に加え、T-TAC 2019 では特に、核変換ディビジョンによって提案された R&D 活動計画について助言することを求める。

付録 III - T-TAC 2019 委員名簿

	氏名	所属	職位
1	Marc SCHYNS	ベルギー原子力研究センター	先進原子力システム研究所長
2	Michael BUTZEK	ユーリッヒ研究所	自動化・磁石ベアリング&ギアチーム リーダー
3	Michael WOHLMUTHER	ポールシェラー研究所	放射線輸送・マルチ物理グループ リーダー
4	鬼柳 善明	名古屋大学 工学研究科	工学研究科教授
5	坂本 慶司	国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構	核融合炉材料研究開発部長
6	Georg MÜLLER	カールスルーエ工科大学	副所長、部長、教授
7	近藤 正聡	東京工業大学 科学技術創成研究院 先導原子力研究所	准教授