

**核変換実験施設（TEF）  
技術諮問委員会**

2014年7月10-11日  
東海村

**T-TAC 2014 報告書**

2014年7月31日



## 目次

要旨 .....	4
はじめに .....	5
1. ADS 開発計画 .....	5
2. TEF-T 建設の準備状況 .....	7
2.1 ターゲットヘッド設計の成立性 .....	7
2.2 鉛ビスマス 1 次ループ基本設計の実現可能性 .....	9
2.3 LBE 計装・制御の適用性 .....	10
2.3.1 酸素制御システム用の計装・制御 .....	10
2.3.2 ループ運転・保守のための計装・制御 .....	11
3. TEF-P 概念の妥当性 .....	12
結論 .....	13
本報告で示した勧告のまとめ .....	14
1. ADS 開発計画 .....	14
2. TEF-T 建設の準備状況 .....	14
2.1 ターゲットヘッド設計の成立性 .....	14
2.2 鉛ビスマス 1 次ループ基本設計の実現可能性 .....	14
2.3 LBE 計装・制御の適用性 .....	15
3. TEF-P 概念の妥当性 .....	15
付録 I .....	16
付録 II .....	18
付録 III .....	19

## 要旨

T-TAC（核変換実験施設（TEF）プロジェクトの技術諮問委員会）は、2014年7月10日と11日にわたり、東海村のJ-PARCセンターで開催された。11日には、リニアック加速器トンネル、物質・生命科学実験施設に加え、将来のTEF建設予定地を見学した。T-TACは、スタッフによる詳細な報告を通じてTEFプロジェクトに関する総合的な概念を提示されたことについて、池田裕二郎J-PARCセンター長に感謝する。

加速器駆動システム（ADS）による核変換は、長年にわたりJ-PARCの悲願であった。福島第一原子力発電所事故以降、放射性廃棄物管理に対する国民の関心は大きく高まった。現在、原子力機構（JAEA）は、順調に400MeVに増力された高エネルギーリニアックを利用するTEF施設の新設について、関心を高めている。T-TACは、TEFによりもたらされる科学的機会は世界レベルであり、適切な資源が与えられればTEFは日本の新しいエネルギー基本計画に対し意味のある貢献を果たすことが出来ると判断する。

国際参加に関連して、ベルギーにおけるADSプロジェクトMYRRHAは、J-PARCにおけるADS核変換ロードマップの実現を加速させるために相補的な役割を持ち、TEFがこれと協同することで魅力的なプログラムとなる。

## はじめに

核変換実験施設（TEF）プロジェクトのための TEF 技術諮問委員会（T-TAC）は、2014 年 7 月 10 日と 11 日にわたり、東海村 J-PARC のいばらき量子ビーム研究センター（IQBRC）で開催された。11 日には、リニアック加速器トンネル、物質・生命科学実験施設に加え、将来の TEF 建設予定地を見学した。付録 I に委員会のアジェンダを、また付録 II に J-PARC センター長から委員会に与えられた責務を示す。当日の参加が叶わなかった高橋実委員（東工大）を除き、委員全員（付録 III）が二日間の委員会に参加した。なお高橋委員からは、事前による書面によるコメントの提出があった。

### 1. ADS 開発計画

核変換実験施設計画は、放射性廃棄物の核変換のため、JAEA により提案されている ADS 開発に向けたロードマップの一部として紹介された。J-PARC で R&D に携わっているセクション及び原子力基礎工学研究センターで R&D に携わっているグループについて、JAEA 組織図における位置づけが示された。

JAEAにおける加速器駆動システム（ADS）に関する戦略的観点から、分離変換（P&T）技術を評価するために設置された文部科学省の作業部会によって取り纏められた結果が報告された。この作業部会は文部科学省原子力科学技術委員会の下に設置され、2013年11月に中間取り纏めとして、分離変換とADS開発に関する以下の勧告を示した。

- J-PARCのADSターゲット試験施設（TEF-T）について、ADSの主要課題であるビーム窓の成立性を検証するための材料試験施設として、さらに開発を進めること。
- J-PARCの核変換実験施設（TEF-P）について、未臨界炉心やMA装荷炉心等の炉物理上の課題を解決するため、さらに開発を進めること。
- TEF-T/TEF-Pの段階と実用レベルのADS核変換炉の中間的位置づけとして、日本としてMYRRHAプログラムに参加することを検討すること。作業部会は、適切な水準でのJAEAの参画に関する交渉、またベルギー及びその他関連諸国との相互協力について、進めていくことが妥当であると述べた。
- R&Dについて、工学規模の次のステージに移行すること。ただし、基本的なR&D項目の達成状況、運転保守を含む技術的成立性、規制との整合性等について、今後もチェックアンドレビューが必要である。

2014 年 3 月 10-11 日、J-PARC 国際諮問委員会（IAC）が東海村の J-PARC センターで開催された。IAC は、2014 年 4 月 15 日付報告書において以下の意見を表明した。

- 文部科学省の群分離・核変換技術作業部会によって推奨された分離変換及び ADS 開発の全体戦略について、特に実験室レベルの実証から「工学レベルのプロトタイプ」に向けて移行すべきとの判断は、合理的かつ妥当である。
- プロジェクトの国際化が始まっており、分離変換や ADS 開発の分野で活動している他の組織との間の相互参加や専門家・チームの交流によって国際化を拡大すべきである。
- TEF-P 及び TEF-T 施設の設計は有望に思えるが、IAC 委員は委員会での短い報告内容からその技術的価値を判断することは出来ない。

以上の知見から、IAC は以下を提言した。

- TEF-P 及び TEF-T の設計と安全への取組については、国際的な評価委員会に諮ること。（IAC 2014 提言#9）
- 照射条件に関するより具体的な要求を評価するため、TEF-T 施設の利用者グループに意見を聴き、これに従って施設の性格付けを行うこと。（IAC 2014 提言#10）

- 東海研の重液体金属試験装置群の機能向上は、重複を避けてコストを抑制するため、本分野で活動中の世界の他研究所とのシナジー効果を考慮して行うこと。（IAC 2014 提言#11）
- J-PARC の ADS 施設に適用される安全規則や管理法は、原子力規制当局との合意に基づき、注意深く定めること。（IAC 2014 提言#12）
- 今後、J-PARC（元ターゲット関係者）や JAEA（もんじゅ）で利用可能な人員や専門知識を、この ADS プログラムに関与させること。（IAC 2014 提言#13）

2014年4月に公表された「エネルギー基本計画」第3章4節4.によれば、「高速炉や、加速器を用いた核種変換など、（中略）技術等の開発を、国際的なネットワークを活用しつつ推進する。」とされている。

#### 所見とコメント:

- 臨界の高速炉型（FR）と様々な ADS 型を含む核変換技術の長所と短所を比較する必要性について、T-TAC は検討した。2つの観点と考えられる。
  - a. 戦略的な比較：臨界 FR 対 ADS（窓有りまたは窓無しターゲットベース）については、TEF-T 計画とは独立した問題である。
  - b. ADS 実現のための技術的選択肢：窓有り対窓無しについて、TEF-T との関連性が問題となり得る。

1つめの観点(a)について、OECD/NEA レベルあるいは EU レベルにおいて、ADOPT、PATEROS、ARCAS のような枠組みプロジェクトの中で（欧州委員会の Cordis のページ [http://cordis.europa.eu/projects/home\\_en.html](http://cordis.europa.eu/projects/home_en.html) 参照）、国際的に行われた様々な研究がある。これらの研究では、FR 対 ADS それぞれの技術の長所が示され、ADS により高レベル放射性廃棄物のより効率的かつ集中的な取扱いを先導することが可能であると結論している。

2つめの観点(b)では、この選択肢は ADS による核変換の本質的な能力に影響はしないであろうが、この技術的選択は処理を行う施設の利用率の高低に結びつくことから、現実問題として総合的な効率に影響する。欧州では、実験炉級 ADS（窓無し：MYRRHA, XT-ADS、窓有り：EA-80, XT-ADS-Gas）と実用規模の ADS（窓有り／無し両オプション：EFIT）について、両選択肢による核破砕ターゲットの設計が行われている。

窓有り／窓無しターゲットの技術的選択は、以下のような技術仕様と安全上の考慮によって判断される。

- c. 窓におけるビーム電流密度：50  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  を超えない（陽子エネルギー300～800MeV の範囲において）
- d. 陽子エネルギーについて、エネルギーが低いほど窓材により多くのエネルギー付与があり、窓の損傷につながりやすい。
- e. 窓の損傷時や窓無し設計の場合、揮発性核破砕生成物放出に関連する安全上の課題は、これら物質による陽子ビームラインと加速器の汚染であり、この課題に正しく取り組むべきである。

MYRRHA での典型的な例として、2005 年まで陽子ビームエネルギーは 350MeV に制限されていたため、ビーム電流密度 (> 150  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) 及び窓材へのエネルギー付与の観点から窓なしの設計が唯一の技術的に妥当な解であった。MYRRHA の陽子ビームエネルギーが 600MeV まで拡張されるとともに、MEGAPIE 計画（強度 1.8 mA、エネルギー590 MeV の陽子ビームによる 1 MW の窓あり核破砕ターゲット実験）の経験が反映されたことにより、MYRRHA 計画でも窓ありターゲットに移行した。

上述の3番目の課題、及び揮発性核破砕生成物が連結したビームラインと加速器に生

じ得る汚染に関する安全性に関連して、この課題は窓あり、窓なしのいずれのターゲット設計においても技術的に議論されるべきものとして残されている。

上述の件及び実用 ADS は窓ありターゲット設計に向かっていることを考慮すると、TEF-T 施設は、その主たる目的である窓ありターゲットの工学スケールでの実現可能性の実証及び、高レベル放射性廃棄物核変換のための実用 ADS の技術開発に着手するかどうかの戦略的意志決定に必要な、実証期間中における実現性の実証に寄与する。

- 現在の ADS プログラムの目的は、放射性核種の製造、物理学、液体重金属技術などの研究活動の促進ではなく、「エネルギー基本計画」に記載されている通り、放射性廃棄物の安全な処理・処分のための核変換技術開発に置かれるべきである。ADS プログラムは、この目的に合致しているかの点で厳格に評価されるべきである。
- ロードマップに記載された研究の分類は、以下のように要約される。
  - (1) 加速器技術
  - (2) 原子炉炉心技術  
MA と燃料、核特性（炉心設計、核データ）、被覆管、熱流動
  - (3) ターゲット技術  
ビーム窓技術（照射効果、他）、窓なしターゲット技術
  - (4) プラント技術  
全体システム、一次系システム、プラントヒートバランス（BOP）、安全システム
  - (5) 冷却材/ターゲット技術  
材料/共存性/酸素濃度制御、不純物管理、計装及び Po の制御、熱流動
  - (6) 燃料サイクル/廃棄物管理  
乾式再処理
  - (7) 安全性評価と管理

勧告:

- 1.1 ADS プログラムは、ある程度の設計の多様性と設計パラメータの範囲を有する ADS の候補概念を念頭に計画されるべきであり、R&D の結果は将来の様々な ADS 設計に柔軟に適用出来るものでなければならない。
- 1.2 J-PARC（元ターゲット部門）または JAEA（もんじゅ）の人員や専門的知見を ADS プログラムに結集すべきとする 2014 年の J-PARC 国際アドバイザー委員会の勧告（IAC2014 勧告#13）に加えて、T-TAC は、実用 ADS の設計及び TEF-T の実現の観点から、もんじゅスタッフの ADS プログラムへの参加を検討すべきであると勧告する。鉛冷却高速炉の設計段階において、もんじゅチームの主要メンバーが得た経験は、人員再配置を考える上での資産である。

## 2. TEF-T 建設の準備状況

### 2.1 ターゲットヘッド設計の成立性

世界における多くの ADS プログラムと同様に、核破砕ターゲット材/未臨界炉の冷却材として鉛ビスマス共晶合金（Lead-Bismuth Eutectic, LBE）が選択されてきた。委員会はこの選択を支持する。

TEF のターゲットは、ADS への応用を目的とした核破砕ターゲットのビーム窓の成立性を検証できるものでなければならない。それは、以下の 2 つの方法で達成される。

- TEF ターゲットのビーム窓は、ADS の核破砕ターゲットビーム窓のプロトタイプとして設計され、ビーム入射試験を行うことができる。
- 典型的な条件下における候補材料の挙動試験のため、材料試験片をターゲット内の高粒子束領域に配置することができる。

3つのタイプのターゲットが示された。ターゲット A は、主に試験片照射のためのものとして提案され、サンプルホルダを含む設計である。ターゲット B はプロトタイプ ADS と同形状だが、SUS316L で製作され、実際の ADS よりも低い温度で運転される。ターゲット C はターゲット B と同形状だが、候補材 (T91) で製作され、実際の ADS の温度条件 (550°C まで) で運転される。発表資料では、初号機として提案されているターゲット A に着目していた (粉川他による発表)。ターゲットは同軸の流路構造、凹型ビーム窓を有し、材料には SUS316FR が提案された。ターゲットは水冷式セーフティハルにより覆われている。想定されたターゲット上での最大ビーム電流密度  $20\mu\text{A}/\text{cm}^2$  に対し、有限要素法による解析結果は、静的及び動的応力 (疲労限度も同様に) について設計が非照射材の設計基準を満たすことを示した。提案された設計は、LBE 容器温度 500°C 以下、LBE 容器壁面での流速 2m/s 以下の別な設計基準も満たした。また解析結果は、LBE 中の動圧がキャビテーション発生基準を十分に下回ることを示した。セーフティハルの設計では、LBE 容器の受ける最大 (発生) 応力と動作温度を十分に下回った。このことから、セーフティハルの構造健全性は LBE 容器よりも信頼できるはずである。

ビーム入射による熱は、1 次 LBE 循環系から出口温度 200°C、圧力 2MPa の 2 次水循環系へ伝えられる。この出口温度は、2MPa における水の沸点より 12°C 低い。

#### 所見:

- 計算されたビーム窓と材料試験片を収納する領域の材料損傷率は、ADS への応用のために材料照射データを提供するにあたり有用な範囲内にある。
- 照射試験のためのターゲット A の設計研究は、着実に実施されている。LBE 流量、圧力、応力の結果が示された。圧力波による影響とキャビテーション損傷は極めて小さく、繰り返し熱応力も許容値以下であることが示された。
- 最大許容電流は約  $30\mu\text{A}/\text{cm}^2$  である。
- 同軸流路の構造は、エネルギー付与が最も高いビーム窓中心に、流れのよどみ域を形成する。他の設計 (例えば MEGAPIE ターゲット) では、この“止水”領域の形成を避けてきた。
- 運転時のビーム窓温度は、運転時の試験片温度よりも高い。

#### コメント:

- ビーム窓の許容制限を超えた温度で材料試験片を照射できるターゲット設計によって、材料照射プログラムは十分な役割を果たすだろう。
- 合理的なターゲット寿命を確認するため、照射損傷による許容応力制限の低下を考慮に入れたターゲット寿命評価を行うべきである。
- 2 次系において、気液 2 層流の発生を避ける余裕がほとんどない。
- 設計研究は、平均ピーク電流密度が  $20\mu\text{A}/\text{cm}^2$  の陽子ビーム形状で実施された。一方で、ビーム形状はピーク電流密度として  $10\mu\text{A}/\text{cm}^2$  から  $50\mu\text{A}/\text{cm}^2$  まで変更可能であることが示された。従って、照射損傷量の要求を考慮しつつ、異なるビーム形状でも設計研究を実施することが望ましい。この設計においては、出力増強スケジュールも考慮すべきである。
- ターゲット B と C は、流量、温度等の条件を明確にした後に設計するべきである。
- ホットセル内に保管できるターゲットの数は、施設の寿命を決定する。従って、ターゲットの寿命評価は極めて重要であり、寿命評価後に保管数量を決定するべきである。

#### 勧告:

2.3.1 可能性のある全ての ADS 候補概念に役立つよう、設計パラメータ (流量、壁面と試験片の温度、流速、ビーム電流密度、dpa と He 生成量) の範囲を明確にせよ。



- 2.3.2 同軸流路構造に起因する滞留域での流動と伝熱状況を予測するため、CFD コードの適用性を慎重に評価し、またビーム窓温度予測値に高い信頼を持てるよう、十分な設計裕度を確保せよ。
- 2.3.3 ターゲット性能と関連する材料照射シナリオを検討し、また dpa の予測値を評価せよ。
- 2.3.4 二次系の異常事象（例えば、電源喪失、二次系流量喪失、等）に対する挙動を評価せよ。

## 2.2 鉛ビスマス 1 次ループ基本設計の実現可能性

発表では、J-PARC センター核変換セクションがここ数年の間に LBE の材料研究の分野で「学んだ教訓」が明確に示された。多くの静的及び流動試験設備が製作され、異なる温度、流速及び酸素濃度中において関連する構造材料の共存性挙動を評価することに重きを置いて運転されてきた。

### 所見とコメント:

- 「酸素制御無し」の試験は、信頼できる説明をするにあたり有意義とは思えず、少なくとも解釈が難しい。
- 腐食試験に加え、流動試験ループの部品としてのジョイント、フランジ及びバルブの使用に関する研究が、過去 10 年間の努力の多くを占める。それにもかかわらず、KITにおいて委員自身が実施した大規模な液体重金属実験で得たこれら部品に関する知見は、液体重金属ループの安全な運転のためにはジョイント及びフランジの数は最小限にすべきであるという結論である。これらの部品がシステム故障の一因となるリスクは、信頼できる運転を行うには甚だ高い。
- 将来の TEF-T の設計と建設に向けて、LBE 中における材料試験を適切な条件下で行うには、現在の設備はもはや適切ではない。そこで新しい「高温材料腐食試験ループ（HTC ループ）」の計画は不可欠であり、T-TAC は完全に支持する。T91 と SS316L の腐食データを得るために、適切な流速と完全な酸素濃度制御下において想定運転温度範囲を 550 度とすることは、将来の TEF-T の運転に対して適切である。T91 と SS316L だけが TEF-T の構造材料の候補だろうか？もしそうであるなら、T-TAC はこの材料選択の説明にかなる言及もしない。それでも、2019 年に運転を開始する TEF-T と密接に関連する 2022 年までの HTC ループの試験計画を考慮すると、必要に応じ類似しているターゲット概念 A-C の設計変更を認めることが保証されるべきである。
- 提案されている HTC ループの試験部、酸素制御系それぞれの配置と酸素濃度制御装置は発表では明確ではなかったものの、構想されている全体の試験計画は、TEF-T の将来の設計要求に合致した、とても合理的なものである。
- HTC ループを補完するため、追加の装置 2 台、つまり「LBE 技術試験装置(1)」と「TEF-T ターゲットステーションモックアップループ(2)」が予定されている。装置(1)は、遠隔操作技術、フリーズバルブ、及び液体金属関連の計装機器に特化するように計画されている。これは、フリーズバルブを除いて間違いなく有意義であり、TEF-T の運転に必要なものである。T-TAC は、TEF-T のような大規模な装置にフリーズバルブを使用することに関しては納得してはいないが、一方、計装機器及び遠隔操作技術の開発と検定は優先順位が高い。核変換セクションの構成員によって設定された目標はよく定義され、TEF-T の実現に対して適切である。加えて、TEF-T のシステム挙動（熱除去、電磁ポンプなど）を調べるためのモックアップループの製作について、T-TAC は完全に支持する。しかしながら、両装置のスケジュール中で 2018 年からの活動「先進技術の開発」はまだ明確ではなく、T-TAC が近い将来その意義を評価するため、明確化すべきである。この活動の必要性の大部分は良く述べられているものの、さらなる明確化が必要である。

勧告:

- 2.2.1 故障のリスクが高いため、既存及び計画中のループにおいて、ジョイント、フランジ及びバルブの使用について熟考せよ。
- 2.2.2 HTC ループから得られる新しい知見をターゲットの設計・建設に反映できるよう、両者の密接な関連を確保せよ。
- 2.2.3 試験部と酸素濃度制御装置の設計に関して、現存するループから得られる知見をより明確にせよ。
- 2.2.4 関連材料について、TEF-T 条件下での機械的挙動試験も検討せよ（例えばビームトリップによる疲労）。
- 2.2.5 材料試験に関する詳細計画（温度、酸素濃度、LBE 流速）を立案せよ。
- 2.2.6 化学分析（不純物）用に HTC ループから LBE をサンプリングすることを想定せよ。
- 2.2.7 これらのループと TEF-T の運転に対する統合的な安全解析について検討せよ。

## 2.3 LBE 計装・制御の適用性

### 2.3.1 酸素制御システム用の計装・制御

今後期待される核変換用原子炉の冷却材として、鉛や LBE のような液体重金属を用いる場合における重要なチャレンジの一つは、主に鉄鋼系の構造材や被覆材と冷却材の共存性である。材料腐食の最小化の方法は、例えば鉄やクロムについて、その表面の酸化を促して安定な防護用酸化膜を形成するため、LBE へ制御された酸素を供給することである。酸素濃度は、鋼材の主要な構成要素である鉄の酸化に十分でなければならない、一方で、酸化鉛が生じる値を超えてはいけぬ。従って、酸素濃度の範囲は、 $10^{-5} - 10^{-7}$  wt.-% の間に保たなければならない。最近数年の間、世界中の幾つかの研究所の研究者が、核変換システムに妥当な温度における液体 LBE 中での、構造材および被覆材として考えられているオーステナイトおよびフェライト鋼の適合性を調査した。

所見とコメント:

- LBE 中の鋼材との共存性に関する化学および酸素の影響に関する特定の課題については、T-TAC 用のプレゼンテーションで良く述べられていた。
- LBE 中の酸素濃度の制限は  $10^{-4} - 10^{-8}$  wt.-% となっていたが、実際の適用を考えると広すぎる。高い値は、400 から 550°C の範囲の溶解限界に近く、低い方は、鉄ベースの物質の溶解腐食の開始に近いことを考慮しなければならない。よって、より狭い範囲、約  $10^{-5} - 10^{-7}$  wt.-% が望ましく、システムとしてもより簡単になる。
- LBE 中での酸素濃度制御は、適切な酸素供給・除去プロセスが求められ、また液体 LBE 中の酸素濃度を正確に測定することが必要である。最初のステップとして、SCK・CEN および KIT との国際的な協力のもと、異なるタイプの酸素センサー試験を開始している。要求される温度範囲において、全てのセンサーが十分な精度と信頼性を示した。これらの結果は、将来の TEF-T における OCS（酸素濃度制御システム）での使用を促すものであり、T-TAC は高い優先度でこの活動を継続することを勧める。
- 酸素センサーの校正は、OCS での利用において必要不可欠である。現在のスケジュールでは、校正プロセスの開発が 2019 年からの TEF-T 運転と並行しているように見える。T-TAC は、この開発を TEF-T の建設・運転前の 2018 年までに終了させるため、既存の協力体制を強化することを推奨する。JLBL-4 ループにおける流れ条件での酸素センサー試験は絶対に必要であり、全体のスケジュールにうまく取り込まれている。
- なお、現在の「濡れた」酸素制御方法の開発は、現在の公開文献で公開されている「最先端の」酸素濃度制御システムと一致していない。気相における平衡酸素分圧のためにアルゴンガスへ水蒸気を加えることは、LBE 中の酸素濃度の明らかなばらつきと、ガス配管を含んだ酸素供給装置の気相に多量の「ブラックダスト (PbO)」の形成に至る。

ガスシステムの破損と閉塞は除外されていない。その一方で、5 年以上におよぶ大規模な LBE 試験ループでの適用性が認められた最適化されたプロセスが既に公開されている。

#### 勧告:

- 2.3.1 流れ場での酸素センサー試験を強化せよ。
- 2.3.2 水蒸気添加によらない新しい最適化されたプロセスを参考として、酸素制御のための気体-液体交換方法を修正・最適化せよ。
- 2.3.3 酸素濃度制御の範囲を  $10^{-5} - 10^{-7}$  wt-% に狭めよ。
- 2.3.4 酸素センサーの長期的な動作が明確に示さなければならない。
- 2.3.5 酸素センサーの校正方法が評価されなければならない。
- 2.3.6 PbO 方式による酸素制御は、長期のオプションとせよ。ただし、TEF-T で用いるには余りにも複雑になるだろう。
- 2.3.7 TEF-T における照射下での酸素センサー試験は奨励される。
- 2.3.8 酸素制御システムに関連する国際協力を継続せよ。

#### 2.3.2 ループ運転・保守のための計装・制御

一次ループシステムの運転環境や主要な測定パラメータに特有な測定器の要求仕様について説明がなされた。温度やカバーガス圧力の測定は、現状の技術で可能である。しかしながら、冷却材の圧力、液位、及び流量を測定するシステムは研究開発テーマである。これらのシステムを開発するロードマップには、2014 年の予備試験、2015 年の流動下における全システムの長期間試験、そして、TEF-T の建設を計画している最初の 2 年間（2016～2017 年）の MLF での放射線環境下試験が含まれている。

フィルターや流路の閉塞を検知するために、ループにおける各機器での圧力や圧力損失の測定が考えられている。差圧式流量計は、主流量計として多様性を持ったシステムであると考えられている。サージタンクやドレインタンクに設置された液位計は、一次系の流路やドレインバルブで起こりえるわずかな漏れを検出するために使用される。流量計の測定値は、ビーム窓の冷却能力に直接関係する。

現在開発中である液位計と圧力計による測定値の比較が示された。これらの測定値は 300°C における静的な条件下で行われた同一の試験で記録されたものである。この結果の解析から、ほぼ全ての液位測定域で二つの計測器による測定値は一定のバイアスを持っていることが示された。これは有望な結果である。

コリオリ流量計、差圧式流量計、電磁流量計など、いくつかの候補の中から超音波式流量計を選択した根拠が示された。選択にあたっては、MLF や JAEA における経験も考慮されている。選択された超音波変換器の 500 度までの耐熱実験と JLBL-4 ループ試験における超音波式流量計の確認実験の解析では、良い結果が得られていた。このため、LBE に全く接液しない超音波流量測定システムを開発する次の段階に進むべきである。この場合、超音波変換器は配管外表面に取り付けられる。

#### 所見:

- ナトリウム冷却高速炉システムや J-PARC の MLF 等、他の部門で得られた経験を考慮して、測定器の性能を確かめる研究開発を計画している。
- 圧力、液位、及び流れを対象とするセンサーの開発に関連して提案されたロードマップや手段については妥当である。
- 予備実験や最初に行った実験については有望な結果が得られ、選択した方法が正しかったことを示した。

コメント:

- 示された計装機器は、運転中の連続監視を行うためのものであり、運転パラメータ（温度、流量及び圧力）を確認し、また構造体や機器の状態（漏えい）を概略で把握するための測定である。運転範囲の変動や逸脱を早期に検出できるパラメータをモニターするために、機械的な歪みや振動の特性などを測定する計装機器をいくつか追加する検討を勧めたい。これらの計装機器により、施設検討時や試運転時の計画値と実運転時の値を比較することが出来る。

勧告:

- 2.3.9 連続測定による状態監視に加え、定期的な検査プログラムにより、設計研究段階で考えられた損傷メカニズムに関する仮説及び計画値が検証されるべきである。材料の機械的特性を劣化させる過程や腐食損傷を生じさせるような、予見できないメカニズムが無いことを確認しなければならない。このため、休止及び保守期間に定期検査を行うための装置、例えば非破壊型技術に基づくものがどうか調査せよ。
- 2.3.10 計画中の計装機器類により、安全検討の結果（検出すべき現象や起因事象とそれに続く応答時間）や潜在的危険性（障害の種類や大きさ）に基づき、必要な項目が全て測定可能かを確認せよ。

### 3. TEF-P 概念の妥当性

TEF-P 概念が TEF-P の目的と共に説明された。TEF-P の目的は 1. ADS 設計に関連する核データの検証、2. ADS の炉物理、3. 零出力の ADS 運転、そして、4. 他の炉形の炉物理、である。原子炉概念としては、FCA の燃料板と kg オーダーの MA 燃料が使用可能な水平二分割型炉心が選ばれた。このコンセプトは妥当であると考えられる。

商業用 ADS では鉛ビスマス合金を核破碎ターゲット及び冷却材として、窒化物 ((MA+Pu)N+ZrN) を燃料として用いることを計画しているが、TEF-P では酸化物燃料を用いる。燃料形態の違いは工学段階では問題となるが、基礎研究段階において酸化物燃料を用いる概念は合理的である。これは、核データの検証としては、未臨界度の不確定性は主に Pb、Np 及び Am の核データ不確かさに起因するからである。従って、TEF-P の炉心性能に及ぼすこれらの核データの影響を見積もるのに、TEF-P は非常に役立つ。

TEF-P の実験スケジュールが、初臨界、MA 燃料供給などのマイルストーンと共に示された。主な実験目的として、ADS にとって非常に重要である ADS 核データ、ADS 炉物理、及び ADS の運転が示された。進め方は妥当であると評価する。T-TAC では、現段階の TEF-P に関して概要のみが説明されたため、TEF-P 計画のより詳細なレビューが将来必要であることを指摘しておきたい。

勧告:

- 3.1 TEF-P 計画を達成するためには MA 燃料の準備が不可欠である。Pu と MA 燃料の使用可能性を確かなものにせよ。
- 3.2 TEF-P 計画は高速炉を用いた MA 核変換計画にも非常に役に立つ。高速炉 MA 核変換のプロジェクトと協力して計画を進めよ。

## 結論

核変換実験施設プロジェクトのための技術諮問委員会 T-TAC は、2014 年 7 月 10 日と 11 日にわたり、東海村 J-PARC センターで開催された。11 日には、リニアック加速器トンネル、物質・生命科学実験施設に加え、将来の TEF 建設予定地を見学した。

実用 ADS ではビーム窓有リターゲットの設計に向かうであろうことから、実用レベルでの高レベル放射性廃棄物の核変換を目的とした ADS 技術に向けた戦略的決定を下すのに必要な実証期間中に、ビーム窓の実現性と運用性を工学的規模で実証するという主目的に TEF-T が貢献すると、T-TAC は考える。T-TAC 会合の期間に提示された ADS プログラムの目的は、放射性同位体の生産や物理学、一般的な液体重金属取扱技術のような研究活動の促進ではなく、「エネルギー基本計画」に書かれているような放射性廃棄物の処理処分の安全性を高めるための核変換技術の開発に焦点が絞られるべきである。TEF-T の多目的利用は確かに高い柔軟性を与えるが、施設の狭さから、空間、遮蔽、アクセス、バックグラウンドの相互干渉等に関して隣接する装置や実験が相互に影響を与えてしまう潜在的可能性や、ターゲット集合体の製作コストに影響するような問題が生じるかも知れない。

T-TAC は、TEF-T の「ビーム輸送及び入射」に向けた検討はかなり進んでおり、2016 年に建設作業を開始する計画は信用できると考える。実際、J-PARC はビーム輸送に関する広範な専門的知識を有している。さらに、TEF-T のために行う土木工事は限られている。7 月 11 日の見学において T-TAC が観察できたように、400 MeV 加速器トンネルには既に TEF-T にビームを輸送するための初段の通路が設けられており、TEF-T の建設に際して、敷地準備のための既存設備の解体作業を必要としない。TEF-P を加速器ビームから切り離すための安全策の取り組みは信用できる。T-TAC は、TEF-T と次のステップで実現しようとしている TEF-P との共存は可能と判断する。

一方で、ターゲットヘッド、鉛ビスマス主ループおよび必要な機器・制御の具体化に向けた活動は、提示されたスケジュールに従って前進させることができる。T-TAC はこれら項目に対する勧告リストを作成した。

国際参加に関連して、ベルギーにおける ADS プロジェクト MYRRHA は、J-PARC における ADS 核変換ロードマップの実現を加速させるために相補的な役割を持ち、TEF がこれと協同することで魅力的なプログラムとなる。

T-TAC メンバーは、TEF チームが安全に対する高い意識を持っていることを確認し、次の段階では安全性に高い優先順位が求められる。T-TAC は、J-PARC が専門家として TEF プロジェクトの課題に対処していると確信し、適切な資源が与えられれば、高レベル放射性廃棄物を工学的なレベルで核変換するための ADS の開発に貢献でき、科学的、技術的かつ社会的に重要な利益を生み出すことができると確信する。

## 本報告で示した勧告のまとめ

### 1. ADS 開発計画

#### 勧告#1.1

ADS プログラムは、ある程度の設計の多様性と設計パラメータの範囲を有する ADS の候補概念を念頭に計画されるべきであり、R&D の結果は将来の様々な ADS 設計に柔軟に適用出来るものでなければならない。

#### 勧告#1.2

J-PARC（元ターゲット部門）または JAEA（もんじゅ）の人員や専門的知見を ADS プログラムに結集すべきとする 2014 年の J-PARC 国際アドバイザリ委員会の勧告（IAC2014 勧告 #13）に加えて、T-TAC は、実用 ADS の設計及び TEF-T の実現の観点から、もんじゅスタッフの ADS プログラムへの参加を検討すべきであると勧告する。鉛冷却高速炉設計段階において、もんじゅチームの主要メンバーが得た経験は、人員再配置を考える上での資産である。

### 2. TEF-T 建設の準備状況

#### 2.1 ターゲットヘッド設計の成立性

##### 勧告#2.1.1

可能性のある全ての ADS 候補概念に役立つよう、設計パラメータ（流量、壁面と試験片の温度、流速、ビーム電流密度、dpa と He 生成量）の範囲を明確にせよ。

##### 勧告#2.1.2

同軸流路構造に起因する滞留域での流動と伝熱状況を予測するため、CFD コードの適用性を慎重に評価し、またビーム窓温度予測値に高い信頼を持てるよう、十分な設計裕度を確保せよ。

##### 勧告#2.1.3

ターゲット性能と関連する材料照射シナリオを検討し、また dpa の予測値を評価せよ。

##### 勧告#2.1.4

二次系の異常事象（例えば、電源喪失、二次系流量喪失、等）に対する挙動を評価せよ。

#### 2.2 鉛ビスマス 1 次ループ基本設計の実現可能性

##### 勧告#2.2.1

故障のリスクが高いため、既存及び計画中のループにおいて、ジョイント、フランジ及びバルブの使用について熟考せよ。

##### 勧告#2.2.2

HTC ループから得られる新しい知見をターゲットの設計・建設に反映できるよう、両者の密接な関連を確保せよ。

##### 勧告#2.2.3

試験部と酸素制御装置の設計に関して、現存するループから得られる知見をより明確にせよ。

##### 勧告#2.2.4

関連材料について、TEF-T 条件下での機械的挙動試験も検討せよ（例えばビームトリップによる疲労）。

##### 勧告#2.2.5

材料試験に関する詳細計画（温度、酸素濃度、LBE 流速）を立案せよ。

##### 勧告#2.2.6

化学分析（不純物）用に HTC ループから LBE をサンプリングすることを想定せよ。

#### 勧告#2.2.7

これらのループと TEF-T の運転に対する統合的な安全解析について検討せよ。

### 2.3 LBE 計装・制御の適用性

#### 勧告#2.3.1

流れ場での酸素センサー試験を強化せよ。

#### 勧告#2.3.2

水蒸気添加を用いない新しい最適化されたプロセスを参考として、酸素制御のための気体-液体交換方法を修正・最適化せよ。

#### 勧告#2.3.3

酸素濃度制御の範囲を  $10^{-5} - 10^{-7}$  wt-% に狭めよ。

#### 勧告#2.3.4

酸素センサーの長期的な動作が明確に示さなければならない。

#### 勧告#2.3.5

酸素センサーの校正方法が評価されなければならない。

#### 勧告#2.3.6

PbO 方式による酸素制御は、長期のオプションとせよ。ただし、TEF-T で用いるには余りにも複雑になるだろう。

#### 勧告#2.3.7

TEF-T における照射下での酸素センサー試験は奨励される。

#### 勧告#2.3.8

酸素制御システムに関連する国際協力を継続せよ。

#### 勧告#2.3.9

連続測定による状態監視に加え、定期的な検査プログラムにより、設計研究段階で考えられた損傷メカニズムに関する仮説及び計画値が検証されるべきである。材料の機械的特性を劣化させる過程や腐食損傷を生じさせるような、予見できないメカニズムが無いことを確認しなければならない。このため、休止及び保守期間に定期検査を行うための装置、例えば非破壊型技術に基づくものが必要かどうか調査せよ。

#### 勧告#2.3.10

計画中の計装機器類により、安全検討の結果（検出すべき現象や起因事象とそれに続く応答時間）や潜在的危険性（障害の種類や大きさ）に基づき、必要な項目が全て測定可能かを確認せよ。

### 3. TEF-P 概念の妥当性

#### 勧告#3.1

TEF-P 計画を達成するためには MA 燃料の準備が不可欠である。Pu と MA 燃料の使用可能性を確かなものにせよ。

#### 勧告#3.2

TEF-P 計画は高速炉を用いた MA 核変換計画にも非常に役に立つ。高速炉 MA 核変換のプロジェクトと協力して計画を進めよ。

## 付録 I

### T-TAC

核変換実験施設技術諮問委員会

### アジェンダ

#### 7月10日

- 9:00 歓迎と T-TAC の責務 (池田, 非公開)
- 9:10 TAC 委員による非公開審議
- 10:00 休憩
- 10:20 ADS 開発計画 (大井川)
- 10:40-11:40 TEF-T 概要と多目的利用 (佐々)
- 11:40-12:00 JAEA における照射後試験計画 (大久保)
- 12:00 昼食
- 13:30-14:00 核破碎ターゲット設計 (粉川)
- 14:00-14:30 LBE ループ技術 (斎藤)
- 14:30-14:50 LBE 計装機器 (大林)
- 14:50-15:10 LBE 中の酸素濃度 (菅原)
- 15:10 休憩
- 15:30-16:00 TEF への陽子ビーム輸送 (明午)
- 16:00-16:30 ライナックでのビーム分岐 (金正)
- 16:30 TAC 委員による非公開審議
- 17:30 解散
- 18:30 デイナー

#### 7月11日

- 9:00 TEF-P の概要 (西原)
- 10:00 休憩・集合写真
- 10:15 TAC 委員による非公開審議
- 12:00 昼食
- 13:30 まとめと勧告
- 14:30 J-PARC ツアー
- 16:30 解散



## J-PARC サイトツアースケジュール

7月11日

- 14:30 IQBRC 発 (荷物持参)
- 14:35 正門での保安検査 (パスポート準備)
- 14:40-15:10 ① リニアック加速器トンネル (TEF-BT エリア)
- 15:15-15:50 ② 物質・生命科学実験施設 (ターゲット保守セル等)
- 15:55 ③ ハドロン実験施設 (バスの車窓から)
- 16:00-16:15 ④ 核変換実験施設建設予定地
- 16:20 JAEA 発、テラスイン勝田へ



## 付録 II

### J-PARC による T-TAC 2014 の責務

池田裕二郎

T-TAC は、主に以下の責務について助言するよう、求められた。

- J-PARC の ADS ターゲット試験施設 (TEF-T) の概念設計と、TEF-P との共存の適切性
- 基本パラメータ
- LBE 中性子生成ターゲットシステムの実現可能性
  - 陽子ビーム輸送と入射
  - LBE ターゲット冷却手法
  - タイムライン(資源とスケジュール)
  - 運転・保守手法
- 安全面

## 付録 III

### 2014 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