

JAERI-Review

99-015



JP9950402



核融合研究開発専門部会評価結果報告書

1999年5月

研究評価委員会

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibarakiken 319-1195, Japan.

核融合研究開発専門部会評価結果報告書

日本原子力研究所
研究評価委員会

(1999年4月8日受理)

研究評価委員会は、「日本原子力研究所における研究開発評価の基本指針」及び「研究所評価委員会及び研究評価委員会規程」に基づき、核融合研究開発専門部会を設置し、核融合研究開発関連の研究課題について今後5年間の計画の事前評価を実施した。同専門部会は12名の専門家で構成された。

核融合研究開発専門部会は平成11年1月21日～22日に那珂研究所において開催された。評価は、事前に提出された評価用資料及び専門部会における被評価者の説明に基づき、研究評価委員会によって定められた評価項目、評価の視点、評価の基準に従って行われた。同専門部会が取りまとめた評価結果は、研究評価委員会で審議された。本報告書はその評価結果である。

Report on the Results of Assessment of the Ad Hoc Committee
on the R&D of Nuclear Fusion

The Research Assessment Committee

Japan Atomic Energy Research Institute
Uchisaiwai-cho, Chiyoda-ku, Tokyo

(Received April 8, 1999)

The Research Assessment Committee set up the Ad Hoc Committee on the R&D of nuclear fusion based on the Basic Guidelines for the Assessment of the R&D of the JAERI, etc. and assessed the future plan for five years on the R&D subjects for nuclear fusion. The Ad Hoc Committee was organized by 12 academic specialists.

Meetings of the Ad Hoc Committee were held on January 21 and 22 at Naka Research Establishment. According to the assessment method consisted of the subjects, criteria and scope of the assessment determined by the Research Assessment Committee, the assessment was performed based on materials submitted in advance and explanations.

The results of assessment completed by the Ad Hoc Committee were reviewed in the Research Assessment Committee. This report describes the results of assessment.

Keywords : Research Assessment, Nuclear Fusion

核融合研究開発専門部会
評価結果報告書

平成 11 年 3 月

日本原子力研究所
研究評価委員会
核融合研究開発専門部会

This is a blank page.

はじめに

「日本原子力研究所における研究開発評価の基本指針」及び「研究所評価委員会及び研究評価委員会規定」に基づき、核融合研究開発関連の研究課題について平成 11 年以降 5 年間の計画の事前評価のため、研究評価委員会の下に核融合研究開発専門部会が設置された。部会は、評価委員の宮健三教授を含む 12 名の委員で構成された。

専門部会は、平成 11 年 1 月 21 日(木)～22 日(金)に日本原子力研究所那珂研究所で開催された。評価は、事前に提出された評価用資料、及び専門部会における説明に基づき、予め定められた評価項目、評価の視点、評価の基準に従って行われた。開催された両日とも委員だけの打合せ時間が 30 分づつ設けられ、委員の間の検討が行われた。その後、委員は資料を持ち帰り、評価にコメントを付して事務局に送付した。事務局では評価とコメントの全文を整理して資料を作成し、部会長に送付した。各委員とも非常に熱心に検討を行い、寄せられたコメント、意見は膨大なものとなった。全て貴重な意見ではあるが、報告書に全ての意見を載せると長くなり、かえって委員の考えが伝わりにくくなると考えられること、また重複しているコメント、意見も多いことから、部会長がコメント、意見を整理して報告書原案を作成し、各委員に送付して修正を行い、本報告書とした。評価結果全体を見渡して、日本原子力研究所の核融合研究は、高く評価されているとの印象を受けた。

このような評価を行うことは、日本原子力研究所で進められている研究に、より多くの考えを加えることにより、研究をより良く発展させることに寄与するとともに、評価報告書を公開することにより、日本原子力研究所の情報公開の役割も果たすものとする。本報告書をご覧いただき、日本原子力研究所で進められている研究についてお考えのある方は、遠慮なく日本原子力研究所にお寄せ戴ければ幸いです。日本原子力研究所の研究に英知が結集され、日本の核融合研究が世界をリードして発展することを願うものである。

平成 11 年 3 月
核融合研究開発専門部会
部会長
谷津 潔

総合所見

まえがき

全体の評価を通して、日本原子力研究所の核融合研究は高く評価されている。今後この研究活動を維持して、原研が世界の COE として核融合研究をリードして行くことを願っている。原研の研究をさらに発展させる上で、本報告書がいささかでも役立つならば幸いである。専門部会では、原研のさらなる発展を願って、いくつかの要望が上げられている。そのひとつは、外部との共同研究を進めて欲しいとの要望である。原研では既に共同研究を進めており、さらに強化する努力をしていることは強く感じられるが、その上でこのような要望が出されるのは、従来の共同研究システムが必ずしもうまく機能していないからなのであろうか。大学、産業界と率直な意見を交換して、共同研究システムの再構築が必要であると思われる。評価項目の中に波及効果があるが、これは多少意見の分かれるところであった。波及効果があがるように努力すべしという意見と、波及効果にはあまり捕らわれずに、目的の追求を進めるべきであるとの意見がある。波及効果については一律に判断することは難しく、対象に応じて判断すべきものであろうか。

評価を行った 5 分野に分けて次に要約する。

ITER 開発室

ITER 計画が 3 年延長された上、確実に建設されるのか、あるいは何処に建設されるのか不確定な状態において、5 年計画を立てるのは難しい面があるかもしれない。

コンパクト ITER の概念は我が国の提案とのが述べられており、これは高く評価されるとともに、さらなる低コスト化方策の追求が望まれている。ITER は是非とも日本に誘致できるよう今後の努力が求められているが、ITER を日本に誘致できなかった場合でも、日本の核融合開発が頓挫しない継続性のもてる戦略が求められている。そのひとつに、JT-60 を今後も活用するためには、必要とする改修改造が実行されることを望む。

ITER を誘致する上で、サイト決定と、関連法規・基準・指針類の整備、安全審査対応の設計と申請書類の作成等は促進する必要があると感じられる。それらの作業を進める上で、大学との共同研究、産業界の経験の活用は有効に働くものと思われる。なお、ITER への大学の関わり方については、実効を上げるために改善を求める要望もある。さらに ITER を誘致するために、パブリック・アクセプタンスを得るための広報活動が求められている。ITER 開発で培われてきた技術、ノウハウは貴重なものであり、それを温存するための施策も求められている。

核融合工学部

ITER 工学 R&D の国際分担タスクの成果は顕著であり、今後の開発目標もはっきりしていて良い。しかしながら、これまでに挙げた多くの成果は、一定の条件の下での成果で、普遍性に欠けることが心配される。これらの成果を体系化し普遍的なものとするのが求められ、そのためには大学、産業界との実のある協力が有効と考えられる。NBI や ECRH

用ジャイロトロン開発における原研の功績は大きい。超伝導コイルに関しては、日本独自のニオブ・アルミ線等を開発しているが、ニオブ・スズの欧州との協力体制が必要であろう。超伝導コイル(絶縁材料を含む)の耐照射性能を高めることは、核融合動力炉の小型化、低コスト化へつながるとともに、プラントの長寿命化の観点からも重要である。二重壁容器の健全性に関しては、十分な試験・評価が必要であり、振動応答等の特性試験は、水平、垂直を対象にして、減衰定数等を得ることが必要である。核融合動力炉が実用化できるための大きなポイントの一つが、保守、補修性にあり、作業の遠隔操作化、ロボット化は必須であるとともに、遠隔操作化やロボット化への負担そのものを極力軽減させるような構造設計を創出する研究も重視して欲しい。トリチウム施設の実験は数 g のオーダーで行われている。ITER では kg オーダーを取り扱うが、ITER 以前にこのような量を取り扱うことはできず、外挿性のある研究が求められる。原型炉用ブランケットの部品レベルでの照射試験も考慮すべきであると考えられ、そのためには IFMIF が必要と思われる。

物質科学研究部核融合炉材料研究開発推進室

原研では、構造材料としてフェライト鋼(F82H鋼)が、トリチウム増殖材料としてはリチウム含有セラミックスが研究開発されているが、構造材としてのバナジウム合金や液体金属ブランケットの研究が無いことへの疑問がなげかけられている。この分野は、大学との連携、企業の協力が不可欠であり、また協力によって実効の上がる分野であるから、協力を密にして核融合炉材料の研究開発を推進して欲しい。トリチウム増殖材料(Li_2TiO_3)については、トリチウムの放出特性のみでなく、化学的安定性、熱的特性等の基礎的な物性に関するデータの蓄積が望まれる。IFMIF の早期の建設が望まれるが、建設が遅延した時の対策も考慮しておく必要がある。将来の核融合動力炉の実現に対しては、耐照射性、低放射化性に優れた材料の開発が、その死命を決するとも考えられ、従来からの延長の研究とともに、計算科学、計算材料科学を応用したような革新的な研究にも取り組んで欲しい。材料研究は、時間のかかる仕事で、短時間での進展は難しいのかも知れないが、そうであるからこそ、これまで以上に推進することが求められる。

炉心プラズマ研究部

世界の核融合研究を先導してきた炉心プラズマ研究は高く評価され、今後の研究展望や進め方などは適切と考えられる。今後は、高閉じ込め、高ベータなどチャンピオンデータの獲得だけでなく、それらの同時達成に向けた研究に力を入れて欲しい。また同時達成のデータにより、小型、低コストの炉心を実現するための研究シナリオを考えて欲しい。特に炉で電流駆動ができることを実証するデータは重要である。JT-60 の実験結果を物理的に解釈するのに強力な武器となるべき NEXT 計画が弱く、他の研究組織も動員して強力に進めるべきである。原子過程を取り入れた不純物シミュレーションと主プラズマとの総合化モデルの開発は今後重要になると思われるので、積極的に進めて欲しい。JT-60 の W 型ダイバータでは限界があるのか、シミュレーションでその最適な形を追求し、改造方向を追求するというふうに発展すべきである。また JT-60 はパラメータの向上とともに

に、無衝突プラズマにおける物理の研究という位置付けで、アカデミックな成果を目指すことも必要であろう。JFT-2M においてフェライト鋼によるリップルの低減やコンパクトトロイド入射によるプラズマ研究を目指すことは評価できる。リップル低減試験は示されている計画よりも早急な実施が求められるとともに、低放射化フェライト鋼については、磁気特性に及ぼす諸因子(温度、磁場飽和、中性子照射、形状効果、等)の効果について、徹底して調べておく必要がある。トロイド入射は、将来の核融合炉でも必要なものか検討を要する。核融合研究の支持者を増やすためには、専門外あるいは一般の人の理解が必要であり、そのためには炉心プラズマを直感的に説明する物理の発展も期待する。

核融合装置試験部

研究と管理業務、研究計画の遂行と成果の抽出など大変うまく行っている。装置試験部のこれまでの成果は世界的に見てもトップレベルであり、炉心プラズマの高性能化に多大な貢献をしてきた。今後は装置のトラブルに対する診断、対応について体系化し、ITER で生かせるノウハウをマニュアル化するとともに、核融合保全工学を築くような努力が望まれる。そのためには大学、産業界と共同することが有効であろう。ITER が建設されるとして、実験開始が 10 年後であるとする、現在 JT-60 の運転や保守に従事している人の経験を継承するとともに、是非とも若手の育成が必要である。また運転保守に計算機をさらに取り入れることにより、省力化してゆく努力が必要と考えられる。機器開発では、NBI とジャイロトロンの開発は進んでいて、ITER に適用可能なレベルに近づいていることを評価するとともに、ジャイロトロンについてはその重要性を考えて、投資額を増やすべきではないかと考えられる。JT-60 のこれからの問題であるコイルの老朽化には適切に対処することが望まれる。

目 次

1. 専門部会の設置	1
2. 評価方法	1
2. 1 専門部会の構成	1
2. 2 事前評価対象研究開発課題	1
2. 3 専門部会開催	2
2. 4 評価の方法	2
3. 所見及び評価結果	4
3. 1 原研における核融合研究開発の基本方針に対する所見	4
3. 2 事前評価対象研究開発課題の評価結果	9
3. 2. 1 ITER 開発室	9
3. 2. 2 核融合工学部	16
3. 2. 3 物質科学部核融合炉材料研究開発推進室	26
3. 2. 4 炉心プラズマ研究部	33
3. 2. 5 核融合装置試験部	40

Contents

1. Constitution of the Ad Hoc Committee	1
2. Assessment Procedure	1
2. 1 Member of the Ad Hoc Committee	1
2. 2 Subjects of Assessment	1
2. 3 Agenda of the Ad Hoc Committee.....	2
2. 4 Assessment Methods	2
3. Views and Results of Assessment	4
3. 1 Views on the Basic Guidelines for the R&D of Nuclear Fusion of JAERI	4
3. 2 Results of Assessment on Subjects	9
3. 2. 1 Department of ITER Project	9
3. 2. 2 Department of Fusion Engineering Research	16
3. 2. 3 Office of Fusion Materials Research Promotion	26
3. 2. 4 Department of Fusion Plasma Research	33
3. 2. 5 Department of Fusion Facilities	40

1. 専門部会の設置

「日本原子力研究所における研究開発評価の基本指針」及び「研究所評価委員会及び研究評価委員会規程」に基づき、核融合研究開発関連の研究課題について平成 11 年度以降 5 年間の計画の事前評価のため、研究評価委員会の下に核融合研究開発専門部会が設置された。

2. 評価方法

2. 1 専門部会の構成

部会長：谷津 潔 筑波大学教授 プラズマ研究センター長
 評価委員：宮 健三 東京大学大学院工学系研究科教授
 専門委員：岡本 尚武 電力中央研究所狛江研究所副所長
 加藤 隆子 核融合科学研究所教授 研究・企画情報センター長
 小林 重忠 日本電機工業会核融合技術専門委員会委員長
 佐藤 定男 核融合科学研究所教授 大型ヘリカル研究部研究主幹
 杉崎 弓 電子技術総合研究所 エネルギー基礎部長
 田中 知 東京大学大学院工学系研究科教授
 浜田 泰司 核融合科学研究所大型ヘリカル研究部教授
 日野 友明 北海道大学大学院工学系研究科教授
 福田 敏男 名古屋大学先端技術共同研究センター教授
 若谷 誠宏 京都大学大学院エネルギー科学研究科教授

2. 2 事前評価対象研究開発課題

- (1)ITER 開発室の研究開発課題(含む高崎研究所材料開発部極限材料研究室、大洗研究所材料試験炉部ブランケット照射開発室並びに東海研究所物質科学研究部照射解析研究グループ、保健物理部放射線第 1 課及びエネルギーシステム研究部熱流体研究グループ)
- (2)核融合工学部の研究開発課題(含む高崎研究所材料開発部極限材料研究室、大洗研究所材料試験炉部ブランケット照射開発室及び東海研究所エネルギーシステム研究部高温材料強度研究室)
- (3)物質科学部核融合炉材料研究開発推進室に係わる研究開発課題(含む高崎研究所材料開発部極限材料研究室、大洗研究所材料試験炉部ブランケット照射開発室並びに東海研究所物質科学研究部照射解析研究グループ及び核融合中性子工学研究室)
- (4)炉心プラズマ研究部の研究開発課題
- (5)核融合装置試験部の研究開発課題

2. 3 専門部会開催

(1)開催月日

平成 11 年 1 月 21 日(木)～22 日(金)

(2)開催場所

日本原子力研究所 那珂研究所 第 1 会議室

(3)議事次第

第 1 日目(1 月 21 日(木))

- ① 部会長挨拶、事務局説明
- ② 原研における核融合研究開発の基本方針 (太田那珂研所長説明と質疑応答)
- ③ ITER 開発室の研究開発課題 (狐崎 ITER 開発室長説明と質疑応答)
- ④ 核融合工学部の研究開発課題 (松田核融合工学部長説明と質疑応答)
- ⑤ 専門部会内の打ち合わせ

第 2 日目(1 月 22 日(金))

- ⑥ 物質科学研究部核融合炉材料研究開発推進室に係わる研究開発課題
(勝田物質科学研究部長説明と質疑応答)
- ⑦ 炉心プラズマ研究部の研究開発課題 (船橋炉心プラズマ研究部長説明と質疑
応答)
- ⑧ 核融合装置試験部の研究開発課題 (清水核融合装置試験部長説明と質疑応答)
- ⑨ 専門部会内の打ち合わせ

2. 4 評価の方法

事前に提出される評価用資料及び専門部会における説明に基づき、下記の評価項目、評価の視点、評価の基準に従って、評価を実施した。

(1)原研における核融合研究開発の基本方針

全体目標、使命の内訳、研究・業務課題の全体構成、資源計画、原研他研究所との協力・連携、外部機関との協力・連携、等に対する所見(提言、所感等)を記した。

(2)事前評価対象研究開発課題

(i)評価項目及び評価の視点(「 」は評価の視点)

1)項目別評価

(a)部の基本的考え方「①研究開発課題の選定・方向性・目的・目標等の正当性、及び②次期装置(実験炉)或いは核融合炉の実用化を目指した研究開発の中での位置付け、役割等の妥当性」

(b)主要課題領域

(i)目的・意義

(D)研究展望及び達成目標「実験炉、原型炉以降のそれぞれの段階における目標設定の妥当性」

(ii)進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)

(c)予想される成果の波及効果(或いは予想される貢献及び波及効果)

「①研究開発課題の選定・方向性・目的・目標等の正当性、②研究支援業務の評価については、業務の方向性・目的・目標等の妥当性、業務に係る人員、予算の配分の適切性、業務計画の妥当性を考慮、③研究開発計画・研究開発手法の妥当性、及び④期待される成果及び波及効果」

- (c)資源配分「①研究開発資源(資金、人員)の配分の妥当性、及び②主要課題領域、テーマに対する予算・人員等の効率的配分の妥当性」
- (d)原研他部門との協力・連携「特に、原研他研究所との協力・連携の妥当性」
- (e)外部機関との協力・連携「特に、大学との協力・連携の妥当性」
- (f)人材養成の施策「施策の妥当性」
- (g)上記以外の評価項目

2) 総合所見

(ii) 評価の基準

1)の「項目別評価」に対しては、5段階評価とし、その評価結果等を基にして、2)の総合所見(所感、問題点、提言等)を記した。

なお、5段階評価は、5点満点で、5点が「優れている、等」、4点が「やや優れている、等」、3点が「普通」、2点が「やや劣っている、等」及び1点が「劣っている、等」の評価を意味する。

3. 所見及び評価結果

3. 1 原研における核融合研究開発の基本方針に対する所見

3. 1. 1 原研における核融合研究開発の基本方針の概要

(1)全体目標

原子力委員会が策定した「第三段階核融合研究開発基本計画」に基づいて、実験炉の開発を中心とする核融合研究開発を進め、次の段階におけるプラント規模の発電実証を目標とする原型炉への十分な見通しを得る。そのために、実験炉の実現と原型炉の基礎の形成を目標とした、炉心プラズマ技術と炉工学技術の開発を進める。

(2)使命の内訳

- 1) ITER の新しい技術ガイドラインに沿った低コスト ITER を実験炉とし開発に努め、EDA の延長終了以降は、速やかに建設活動に移行する。
- 2) 炉心プラズマ技術に関しては、臨界プラズマ試験装置及び高性能トカマク試験装置を用いて、高性能プラズマ定常維持に係る研究開発を推進し、低コスト ITER の運転裕度の拡大及び一層の高性能化を図るとともに、原型炉概念の高度化に努める。
- 3) 炉工学技術に関しては、実験炉実現の技術基盤をより確固とするとともに、原型炉用開発・増殖ブランケットの試験など、核融合炉材料開発を含んだ原型炉を目指した長期的な炉工学技術の研究開発を実施する。
- 4) 炉心プラズマ研究や炉工学技術の進展に応じて、経済性と環境受容性に優れた核融合炉システムの設計研究を行う。また、核融合エネルギーの多様な利用についての検討を行う。

(3)研究・業務課題の全体構成

上記の使命を達成するために、炉心プラズマ研究部、核融合装置試験部、核融合工学部、ITER 開発室及び物質科学研究部(核融合炉材料研究開発推進室及び核融合強力中性子源研究室)に主要課題領域を課して、研究開発を効率的かつ効果的に進める。

(4)資源計画

各部における主要課題領域に、合理的かつ効果的に予算及び人材を配分する。延長 EDA 終了以降は、速やかに建設活動に適した組織・体制に変更するとともに、資源配分の最適化を図る。

(5)原研内の他研究所との協力・連携

原研の核融合研究開発については、那珂研究所を中心に、東海研究所、高崎研究所、大洗研究所などと緊密に協力・連携し、これまで長年にわたって開発し、蓄積してきた原研の開発技術の総合力を結集して進める。

(6)外部機関との協力・連携

国内の大学・国公立研究機関との研究協力では、従来の研究協力を拡大・充実させるとともに、JFT-2M やトリチウム安全工学での計画段階からの研究参加及び ITRE/EDA 計画への人的交流参加の促進に努める。

産業界とは、我が国の産業技術を結集し核融合装置・機器を建設するとともに、その技術的研究成果を産業界に還元する。

国際協力では、多国間協力及び二国間協力を積極的に進め、世界の核融合研究の COE として、国際的な研究活動の中核の役割を果たす。ITER は、我が国における国際協力の新しい形態であり、原研はその担い手として引続き中心的な役割を果たしていく。

3. 1. 2 所見

(1) 全体目標について

原子力委員会が策定した「第三段階核融合開発基本計画」に基づいて、実験炉の開発を中心とし、炉心プラズマ技術と炉工学技術の開発を進めることは極めて妥当である。しかし、3 年間延長された ITER/EDA の終了以降速やかに ITER 建設段階に進むことを想定して計画することは当を得ているが、5 ヶ年計画の中で、EDA 延長期間以降の部分で平成 12 年度に見直して追加しようとしていることが気掛かりである。計画の記載を後送りしても来年の秋までに建設の方向が明確になれば同じことだから、例えそうであっても研究開発が規模を落とさず継続できるような戦略が必要である。また、実際に建設段階に進むとなると法的準備も含めて、必要課題の“ぬげ”があってはならない。従って平成 12 年度の間評価は重要である。

JT-60 のプラズマ性能、難しいとされていた幾つかの要素技術において、多大な発展を遂げており、実験炉の実現性の向上及び原型炉に向けた R&D についての目標を達成するものとする。核融合研究は、先進的な学術、技術の分野であり、他分野への波及効果も絶大なものがあるので、ITER を国内設置することのみにとらわれることなく、長期的視点も大事にして欲しい。そんな意味からも、国内各機関の研究参加、協力を実質的に十分促進するための具体的な施策が必要である。

他に、JT-60、実験炉、原型炉と発展すべきではあるが、JT-60 から外挿する実験炉は非常にコストがかかることは、INTOR、ITER の 20 年の設計・開発作業から明らかである。この作業に多大のエネルギーを投入するのではなく、トカマクを魅力的にすべく、アスペクト比、三角度、楕円度等様々に変えられる実験等を JT-60 の改造、JFT-2M よりひとまわり大きな装置の新設等で追求すべきである、との考えもある。

(2) 使命の内訳について

ITER 設計、サイト対応設計に関しては、仕様の絞り込み、産業界からの知恵なども徹底して行い、低コスト化を実現してほしい。ITER の国内建設が望まれるが、相手のある国際プロジェクトのこと。首尾良く成就しない場合にも日本の核融合開発が頓挫しないような、柔軟な戦略が欲しい。炉工学技術の研究開発や核融合炉システムの設計研究においては、材料開発の進展やその見通しをつけることは極めて重要である。そのような観点から、材料開発の推進を那珂研に統合することは非常に望ましい。

JT-60 は改修改造によってまだ色々な研究の出来る装置と考える。JT-60 クラスの装置により、高温プラズマ閉じ込めの新しい局面(発明)が多く発見され、多大の貢献が原研よりなされてきたが、まだ、実験炉を魅力的にするには十分ではない。実験炉における物理設計と工学設計に分けるならば、物理に関しては JT-60 を活用して常に実験炉への新しいデータベースを生産できるようにすべきである。

一方、D-T 核融合の社会的受容性を高めるためのトリチウム、ブランケット、材料等の成果を期待する。

(3) 研究・業務課題の全体構成について

那珂研が中心となって、東海研、大洗研、高崎研が協力している。炉心プラズマ技術と炉工学技術の開発研究が主要な課題であり、よく整理された計画であり妥当と思われる。しかし、あまり明確に役割分担を決めてしまうと、境界領域に対応できない場合も生じる。

多くの研究・業務課題があるが、その中で本当のボトルネックは何なのか考慮しつつ進める必要がある。

実験炉(ITER)向けの安全性の R&D を責任を持って実施する部署が曖昧に見える。安全性の評価と R&D の実施は部署を分けたとしても、予算の裏付けのある企画計画立案と R&D の実施は一箇所で行うべきである。

ITER/EDA プロジェクトと原型炉を念頭にした ITER 開発室、核融合工学部、物質科学研究部の第 1 のクラスタ及び JT60、JFT-2M を中心にする、炉心プラズマ研究部、核融合装置試験部のもう一つの第 2 クラスタとの両輪構成には将来性が見られる。柔軟かつ活発な協調を目指して欲しい。

(4) 資源計画について

ITER/EDA 以降の記載が無いことが心配である。是非早めに追加の部分の企画立案が必要である。例えば、予算については決定した予算が少なければ予め計画した項目全てに細かく予算を配分するのではなく、優先順位の高いものに特化するとかして、無理なく実行出来るようにする必要がある。人員計画についても、装置試験部で運転員の高齢化の問題が提起されているが、技術継承のために是非若手に技術を継承出来るよう対応が必要である。

実現性が十分でない要素技術(トリチウム、ブランケット、低放射化材)に対する資源配分は妥当であるか否か検討して欲しい。

(5) 原研他研究所との協力・連携について

那珂研を中心に、東海研、高崎研、大洗研の間で協力と連携が良く行われている。原研が核融合を重視している姿勢が感じられる。那珂研は、炉心プラズマ、超伝導コイル、加熱機器、真空容器、ダイバータ等のプラズマ閉じ込めに直接関係するテーマを担当し、トリチウム、低放射化材料、中性子工学、安全解析等は他研究所の協力を期待するのは合理的である。協力体制は整えられていると判断できるが、その上で、当面何が一番必要なのか、ランク付けは必要であろう。

(6) 外部機関との協力・連携について

外部からの研究申し込みは受け入れることが望ましい。度々話題となったノウハウの伝承、核融合炉安全基準の制定等外部の人の協力も得て早急に進める必要がある。

核融合科学研究所との連携は十分なのかどうかよくわからない。我が国における核融合研究は、実質上、原研が突出していると思われる。大学等の他の機関の力を借りることと養成の意味から、他機関との実質的な協力・連携を強化するとともに、民間の活力、民間の養成にも十分配慮して欲しい。

産業界との協力・連携については、我が国の産業技術を結集して核融合装置・機器を建設するとともに、その技術的研究成果を産業界に還元することと、出向者の積極的受入により技術の継承を図ることが述べられていて、いずれも良いことと考えるが、加えて、下記を今後検討して欲しい。国レベルで実施する研究開発は大切なことではあるが、一般商品とは異なる難しさがあり、産業界が自主的に実施するには無理が生じる。景気が良くて高度に経済成長している時期は良い時代だったかもしれないが、もはやそういう時代ではない。産業界は協力するが、適正な予算措置による発注をお願いしたい。R&D で装置試作を受注したとしてもそれは初物であるから、進めるうちに新たな要素 R&D を行わないと先に進めなくなる場合もある。その場合は、別の予算措置が必要である。要素研究も社内の自主研究はもはや限界に来ている。なお、上記に関連して予算策定や研究開発計画にあたっては産業界の経験を是非使って欲しい。また、産業界への成果の還元について考慮されているが、受注で実施した開発であっても、共同開発者としての成果は認めて欲しい。学会発表にしても特許提案にしても配慮をお願いする。出向者の積極的受け入れについては、産業界側から特別にお願いする場合以外は、是非とも業務協力員として欲しい。

大学、国公立研究機関、産業界とは核融合研究組織としての、国際協力では性格上トカマク社会との接点が多いと思われる。他方、文部省の核融合研は大学・国公立研究機関、特に個々の研究者とのネットワーク構築と運用が進んでいる。国際協力ではステラレータ社会、ノントカマク社会との接点が多く、文部省の多岐路線を反映して充実している。将来の統合編成においても、「夫々の COE」、「開発と教育」を云う 2 本柱が維持され、協調発展することが期待される。

一定の分野で原研と大学の協力関係はうまくいっているようであるが、大学関係者から未だ不十分との意見が多い。実質的に原研でしか行うことができない研究開発項目も今後増加することから、若手核融合研究者の育成を図る上からも本格的な協力スキームを構築することが必要である。特に、2001 年における省庁再編は新しいスキームを構築する良い機会と考える。

数値計算(シミュレーション)では、米国での numerical tokamak 計画をみても、大学と強力な関係を結ぶべきである。大学もあまり人材がない(少数の有能な先生しかいない)ため、有能な先生のいる大学に例えば、寄付講座又は助手の人件費まで原研が負担する等、今後5年間をみて、ダイナミックな展開が必要になるものとする。

炉工学での大学との接点の拡大が必要と考える。

外部機関との協力・連携は種々の委員会を通して行われているが、もっと共同研究というスタイルを採用してもよいと思う。特に、大学の若手研究者の参加が容易になる効果がある。将来の ITER の実験の中心になるのは、現在の大学院生から助手クラスであるので、実験炉に関心が持てるように配慮すべきである。

(7) その他(意見等)

多くの面で原研核融合は立派な成果を挙げていると思う。「原研をして日本の将来のために働いてもらう」ということを強く期待するが、着実にその役割を果たしつつある。ただ研究開発の開発の部分が多すぎて、バランスを失いつつあるのではと言う懸念を覚える。

大学や他分野との協力研究の必要な所以である。

核融合研究は、大型装置による実験を直接支える工学的研究が重要であることは言うまでもないが、理論シミュレーションとともに、長期的に核融合研究を支える基礎物理(例えば粒子輸送、プラズマ壁相互作用、プラズマ原子過程等)の部門もどこかに有った方が良いのではないかと考える。

実験炉の国内建設を中心とした活動方針が立てられているが、国内建設に向けて精力的にやるべきこと(安全審査対応設計・R&D、法規・指針・基準整備等)がある。これは ITER クレジットで賄える金額ではなく、国内独自に明確な予算化を図るべきと考える。例えば、A-BWR の安全審査に関連した作業の一部で、BWR の経験をもとに検討しても、かなりの専門家を投入して5年かかっている事例がある。核融合専門家だけでなく軽水炉専門家の経験を活用する必要もあると考える。

ITER が国際協力の下で進められていること、我が国の経済構造が現在再編過程にあること、省庁再編など政治構造の変革、我が国民の意識変化など、多くの不確定要因の下で、核融合研究開発を安定的に遂行するためには、マンパワーの許す限り、状況の変化に対応できる多様なオプションを用意しておくことが必要である。原研が我が国の原子力政策、特に核融合研究開発の中核機関であり、実質的にも、形式的にも核融合研究開発全体について大きな責任感の下で行動しなければならないことは十分理解できる。一方、あまり形式的な面が出すぎることは、原子力研究開発の考え方についての国民的理解を得るためのマイナス要素になると考えられる。ある程度本音で語る必要があるのではないか。例えば、公式見解はさておき、日本版実験炉、原型炉などいろんな提案を学会、科学雑誌などで提示し、原研(を含む、我が国の核融合研究者)の「やる気」を外部に明示することは可能ではないか。

ITER のトカマク一本であるが、原研としては、大学、企業等に他の方法を(例えば、核融合科学研究所のヘリカル方式)アウトソーシングの観点で、研究を依頼してもよいのではなかろうか。また、ITER の実際の建設のためのエンジニアリング手法が少々欠けている。

原研の核融合研究は、相対的にハードウェアを重視するスタイルで進められてきたが、実験炉から原型炉への道は数 10 年を要し、しかも数台建設されるかどうかであることを考えると、ソフトウェア研究をもっと活用し、研究の柔軟性を高めることが重要と思われる。

3. 2 事前評価対象研究開発課題の評価結果

3. 2. 1 ITER 開発室

(含む高崎研究所材料開発部極限材料研究室、大洗研究所材料試験炉部ブランケット照射開発室並びに東海研究所物質科学研究部照射解析研究グループ、保健物理部放射線第1課及びエネルギーシステム研究部熱流体研究グループ)

(1) 研究計画の概要

1) 目的

ITER 開発室は、我が国の「第三段階核融合研究開発基本計画」に基づき、核融合実験炉 ITER の工学設計活動を実施する。原研は、EDA の実施機関に指定されており、延長期間においても EDA の実施に関する責務を負うことになり、この中核が ITER 開発室である。

2) 達成目標

EDA を 3 年間の延長期間では、コストの低減を図った「低コスト ITER」の設計を完成するとともに、将来 ITER を立地する意図のある極(現時点では日本と EU)のサイトに適合した設計を行う。また、超伝導磁石を初めとする工学 R&D の我が国分担タスクの調整・管理を引き続き実施する。将来の日本立地を目指して安全評価等我が国への受容性検討を継続する。

3) 進め方

「低コスト ITER」については、その基本的な概念を我が国が提案しており、国内設計グループが中心となって全面的な設計分担・支援を行う。

3 年間の EDA 延長期間において ITER 開発室は、設計分担や共同中央チームの支援等、従来の活動を継続するとともに、我が国への ITER の立地を目指し、我が国特有のサイト特性の提示や想定される安全審査への対応など必要な作業を本部、那珂研、東海研等の関連部課室と協力して進める。

4) 主要課題領域

(I) ITER/EDA 那珂共同中央チーム活動支援(主要課題領域 1)

那珂研究所内におかれた国際共同中央チームの活動を支援し、国際設計活動を円滑に推進する。

(II) 国際熱核融合実験炉の工学設計(主要課題領域 2)

ITER/EDA における実験炉設計と工学 R&D を実施する。

(III) 国際熱核融合実験炉の安全評価(主要課題領域 3)

ITER の安全解析を分担するとともに我が国への受容性を検討することによって、我が国への立地可能な ITER の設計を完成させる。

5) 所内外の協力・連携

設計、工学 R&D 及び安全評価の実施にあたっては、那珂研管理部、核融合工学部、炉心プラズマ研究部、核融合装置試験部、東海研保健物理部、エネルギーシステム研究部、

物質科学研究部、バツクエンド技術部、大洗研材料試験炉部、高崎研材料開発部、建設部と協力してこれを進める。ITER の安全性や安全確保の考え方等については、ITER 安全検討委員会を設置し、広く所内安全分野の専門家の指導を受け、想定される安全審査に必要な準備を進める。今後も、原研内関連部課室との連携の一層の強化・増進を図りたい。ITER/EDA に関連する大学等との協力については、文部省側に「ITER/EDA 研究協力委員会」が設置され ITER に関する委託研究の窓口になっており、今後もこの部分の活動が継続される。延長期間における、EDA への大学等からの参加をこれまで以上に積極的に推進し、共同中央チームへの派遣や専門家会合への参加、国内チーム活動への参加・協力を促進する。

(2) 評価結果

1) 項目別評価 (()内の数字は評価点数で、5 が満点)

(a) 部の基本的考え方について (4.2)

基本的考え方は適切であると考えますが、記述が原則的、総論的に思える。即ち、ITER はこれまでに類のない壮大な国際プロジェクトである。これを我が国に誘致し、成功させるためには、研究開発、技術開発のみだけではなく社会一般にまで十分配慮し、理解を求めなければならない。また、結果として ITER が欧州に建設されることになった場合でも、日本の核融合開発を推進せざる必要がある。最終的には国の政策に依るが、その基となるのは ITER 開発室の活動であると考え。柔軟な戦略で進めて欲しい。従来の ITER は、各極の事情や思惑、共通の仕様などによりかなりの高コストであると推察される。コンパクト ITER の概念は我が国の提案とのが考え方に述べられているが、システムの、全体統合的な観点からの徹底的な低コスト化方策が望まれる。

安全審査が EDA 終了後すぐ始められるためには、サイトが決まってい、審査のために必要な申請書類が出来ていなければならない。しかし、拠り所となる規制の法規も指針も出来上がっていない。これを急がせることと、自主的に解決できることは促進していくべきと考える。

EDA 延長期間のワークとして、ITER の標準的、高コストの反省に立ち、低コスト ITER の提案は高く評価できる。提案の推進において、日本が真のリーダーシップを発揮するためにも、過去6年のメリット・デメリットの集約を日本が進んで行い、各極はその経験を有効に活用して進めるべきである。

ITNOR、ITER と20年ほどの設計開発作業は、有益であったがまだ装置建設には遠く、INTOR と同じように消滅する可能性が強い。これは現在の JT-60 等の知識からは実験炉は魅力的でなかったということになる。魅力的にする為に JT-60 改造、中型装置新設への具体的な指針が出てくるべきである。

(b)-1 ITER/EDA 那珂共同中央チーム活動支援 (主要課題領域 1)

(i) 目的・意義について (4.0)

EDA 延長期間以降の開発(建設)体制の検討を進めて欲しい。国内研究所のほか、産業界からも大量に人材派遣が必要ではないか。今から先を見通した計画を示して、対応に備

えさせておく必要があると考える。

外国人に日本の良い研究、活動環境を与え、彼らより高く評価されていることはすばらしい。

(d) 研究展望及び達成目標について (3. 8)

ITER は日本だけで全てをカバーするのではなく、EU とロシアとの共同作業として進め、建設に入れる可能性の高い設計にしなければならない。一方、ITER の定常運転を重視するならば、JT-60 のデータベースを持っている日本の役割は大きいことも確かである。

構造設計基準などの基準類の作成が遅れており、3 年後の ITER 計画がはっきりしないため展望もはっきりしない面もある。

(h) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について (3. 7)

ITER 活動への大学研究者の参加は、今までと違った形態を考えないと実効が挙げられないのではないか。

サイト対応設計を 3 極でどのように位置付けるか、建設のコスト分担をどうするのかは延長期間の早い時期に議論を始める必要があるだろう。

(i) 予想される成果の波及効果について (3. 9)

国際協力、ソサエティへの貢献度は大きい。但し、過去の 10 年を踏えた今後の 3 年に対する取り組みに新機軸を出すことである。

日本国内の一般の人へ、ITER の意味と必要性について理解してもらうことが重要であり、広報においてより努力して頂きたい。

(b)-2 国際熱核融合実験炉の工学設計 (主要課題領域 2)

(i) 目的・意義について (4. 2)

出来るだけコストを低減し、建設可能な ITER を設計するのは適切な目標である。一方、工学設計としては、ITER から原型炉へ進むためには必要な技術開発も検討しておく必要があるだろう。

コンパクト ITER で定常運転核融合炉が実現可能であることをプラズマ物理的だけでなく、エンジニアリング的手法で示すことが必要である。

(d) 研究展望及び達成目標について (4. 3)

低コスト化の要望を受けて、コンパクト ITER への設計変更の考え方は理解できる。但し、オリジナル ITER とコンパクト ITER の研究目標(核融合全体計画に及ぼすインパクト)、目標達成確率の違い(中性子照射量のみか)がわかりにくい。

中性子負荷とフルエンスを下げても、工学機器試験に影響がないことは、判り易く説明する必要がある。

コンパクト ITER の $Z_{eff}=1.5\sim 1.8$ をどう実現するのかについて、一層の R&D を進める必要がある。

(h) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について (3. 9)

ITER 開発室と核融合炉工学部との研究開発の取り合いの考え方が不明である。負磁気シアモードは、高性能化と定常化を高密度領域(高ベータ領域)で同時実現するのは容易でないことを注意しておくことが大切である。特に、ベータ崩壊の物理機構と回避

する方法を確立する研究を、JT-60 に求める必要がある。また、トップデータで無く、総合的な運転条件でのデータがまだ不十分である。

ITER が実際の核融合炉に結びつくというところ(炉設計グループ)との関連も必要である。有機極限材料の研究がやや特異的に見える。

(二) 予想される成果の波及効果について (3. 6)

3 大トカマクの成果の分析は、それらの EDA への適応に当たって膨大なデータベースが構築されたであろう。それらは、コンパクト ITER の実現に寄与するとともに、原型炉、実用炉への橋わたしになると考えられる。産業活動の活性化にも留意する必要がある。

(b)-3 国際熱核融合実験炉の安全設計 (主要課題領域 3)

(イ) 目的・意義について (4. 3)

日本での立地条件として、安全設計は非常に重要であり、他極にない課題である。しかし、その整備が日本での建築への最大の切り札となろう。原子力発電所の建設における経験を生かすことが大切である。

立地可能な ITER の説明とは免震のことか、各種安全基準のことか、記述文が説明不足で具体的内容が判らない。ITER の JCT との緊密な連携が重要である。

(ロ) 研究展望及び達成目標について (3. 8)

低コスト ITER と高コスト ITER の安全評価はどこが異なるのかははっきりしない。ほとんど同じではないのか。東海研へ安全検討委を作って検討を進めているなどその努力は評価できるが、その成果がどう得られているか不明である。

必要な R&D 項目が網羅されているか心配であり、経済性に対する検討も必要である。また、展望にも不確かな面もある。

(ハ) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について (3. 5)

日本の事情を ITER に反映させると云うのは重要かつ不可欠のことであるが、これに対する外国の理解を得るのも重要な事柄と思われるが、どうなっているのか。欧州に建設される場合、逆のことが云えるが、矛盾がないようにしておく必要がある。

国内立地を想定して作業を進めていることから、「安全規制」等法的項目が設計、コスト、建設期間等に影響が及ぶならば、計画全体の整合性を保つ上からも国内立地に係わる法的整備作業等を早急に進めることが必要で、電力・企業等からの専門家の協力も必要ではないか。

原研においてはこれまで JRR、JPDR、高温ガス炉など自力で法的、安全評価手法、などを整備しながら、設計、建設してきた良い経験がある。ITER においても、原研の総力をあげて取り組んでもらいたい。

(ニ) 予想される成果の波及効果について (3. 7)

目立った波及効果はないのではないかと。ITER の建設を実現すれば、波及効果は自然に表れるかも知れない。

(c) 資源(予算、人員等)配分について (3. 7)

適切であるかどうか判断が難しいが、安全性評価に対する資源配分が著しく低く思われる。また、設計を外部へ発注する際の、適正な予算は確保されているか配慮されたい。

(d)原研他部門との協力・連携について (3. 5)

従来、協力や連携は不十分であったが、最近、状況は大きく改善されようとしており、その意思是評価できる。

共同中央チームと ITER 開発室との仕事の内容の分担がはっきりしない。開発室の独自性は何か。

ITER の設計活動に関して、他部門との協力は比較的限定されているように見える。ITER が建設される確率はどれくらいか。建設されるとして、ITER 計画と原研との関係はどうなるのか等の不確定要素もあるので、中途半端になる面もあるだろう。

(e)外部機関との協力・連携について (3. 3)

大学・産業界との協力は是非必要である。ITER 計画の全日本的推進と言うが、その具体的方法が見えないので、何か新しい理念や新しい仕組みを考える必要があるのではないか。

(f)人材養成の施策について (3. 8)

人材養成計画は、実験炉の日本での建設と運用までも考慮して進められるべきで、安全審査対応の専門家を早急に育成する必要がある。

ITER が建設され、実験が開始される時に、主力になるのは、30 前後の世代であり、若手研究者が ITER に関心を持つように努めなければならない。

2) 総合所見(所感、問題点、提言、等)

ITER が予定通り発進していたならば、既に建設準備に入っていたはずで、その目標に向かって進めてきたはずであると考え、現在の状況は十分とは考えられない。目標達成度はあいまいなものでなく、真摯な判断を下し、その反省の上に立って次の計画を立案する必要がある。

ITER 技術のデータは原研が提供し、そのデータに科学的普遍性を与えるために基礎研究を通じた体系化は大学の役割とする。何もかも原研がやってしまうと云うと、原研は孤立する。なお、ほとんどの炉工学研究が ITER driven になっていて、炉工学を長期的に展開発展させていく上からは良し悪しではないだろうか。開発型に重点が置かれ過ぎになると、一般性が失われ、データが一過性になり、有用性が少なくなる。原研の場合、装置工学的傾向が強すぎ、理論面を補強するため大学との協力を活用した方が良い。また、問題解決型の研究となっており、目標は着実に達成されつつあり高く評価できるが、これだけではコスト低減化に積極的に貢献しない。

ITER サイト決定と関連法規・基準・指針類の整備促進、安全審査対応の設計と申請書類の作成促進、建設体制の検討と EDA 延長期間後の計画立案促進、及び産業界の経験の活用と適正予算の準備、を行うことが必要である。

必ずしも、ITER チームの責任とは考えられないが、ITER 開発研究が ITER 関連技術面のみに限定され、実用核融合炉全体計画での位置付けが明確でない。ITER 計画を含む核融合研究開発への支持基盤を確保するために、この点への配慮が必要である。

核融合研究が活性化して行くためには ITER の建設が重要であり、日本のハイテクノ

ロジーの向上に寄与する。このため、国内建設をターゲットにした物理、工学、安全の R&D をより一層進めることが重要である。また、一般の人の ITER についての広報、大学研究者との接点の拡大をより進めて頂きたい。

ITER の研究開発を、コンパクト ITER に中心を据えて行っており、現実的な対応を取りつつある。国際研究協力として、国際研究を積極的に推進し、その中で、国際的にリーダーシップがとることができる人材と知見を集積化することが望まれる。また、大学や企業への研究委託を積極的に行い、比較的少ない人員での成果を大きくできるように、アウトソーシングすべきであろう。

ITER のコストを低減すれば建設が本当に可能か。現在は 50% に下げることが目標にしているが、3 年後さらに低減を要求され、実験炉の建設が遠くなる可能性もあることを認識しておく必要がある。ITER では、kg レベルのトリチウムを扱うことになるが、これは現在トリチウム施設で研究用に扱っているレベルとは違うので、本当に大丈夫かという質問に答えることもできなければならない。

項目別評価の評価点をまとめたものを表 1 に示す。

表1 ITER 開発室の事前評価対象研究開発課題の評価結果
 (含む高崎研究所材料開発部極限材料研究室、大洗研究所材料試験炉部ブランケット照射
 開発室並びに東海研究所物質科学研究部照射解析研究グループ、保健物理部放射線第1課
 及びエネルギーシステム研究部熱流体研究グループ)

評 価 項 目	評価点 (5点満点)
(a) 部の基本的考え方について	4.2
(b)-1 ITER/EDA 那珂共同中央チーム活動 (主要課題領域 1)	
(i) 目的・意義について	4.0
(ii) 研究展望及び達成目標について	3.8
(iii) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について	3.7
(iv) 予想される成果の波及効果について	3.9
(b)-2 国際熱核融合実験炉の工学設計 (主要課題領域 2)	
(i) 目的・意義について	4.2
(ii) 研究展望及び達成目標について	4.3
(iii) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について	3.9
(iv) 予想される成果の波及効果について	3.6
(b)-3 国際熱核融合実験炉の安全設計 (主要課題領域 3)	
(i) 目的・意義について	4.3
(ii) 研究展望及び達成目標について	3.8
(iii) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について	3.5
(iv) 予想される成果の波及効果について	3.7
(c) 資源(予算、人員等)配分について	3.7
(d) 原研他部門との協力・連携について	3.5
(e) 外部機関との協力・連携について	3.3
(f) 人材養成の施策について	3.8

3.2.2 核融合工学部

(含む高崎研究所材料開発部極限材料研究室、大洗研究所材料試験炉部ブランケット照射開発室及び東海研究所エネルギーシステム研究部高温材料強度研究室)

(1) 研究計画の概要

1) 目的

将来の核融合炉を見定めながら、その実現に必要な工学的研究、技術開発、及び試験研究を実施する。このため、中、長期的な研究開発を必要とする課題を対象とし、

- (イ)核融合実験炉 ITER を目的とした ITER 工学 R&D の我が国分担分の実施、
- (ロ)近未来及び将来の核融合炉に向けての基礎的、長期的な炉工学技術の研究開発、により核融合炉に必要な技術基盤の確立を図る。

2) 達成目標

核融合実験炉実現のために必要な全ての炉工学技術開発の中核的役割を担う。また、原型炉以降の長期的な炉工学の研究開発についての技術基盤の整備に努める。

(イ)ITER 工学 R&D

ITER 工学設計活動の 3 年間の延長期間においては、これまで 6 年間に開発した機器や試験体並びに装置を用い、実機に外挿できる規模でシステム試験を実施する。また、加熱装置や計測機器、トリチウム技術、ブランケット技術などの開発を行い、設計裕度や運転裕度を見極めるとともに、安全性・信頼性の向上と製作コストの低減を図る。

(ロ)炉工学技術

炉工学技術の研究開発は、ITER の技術基盤となる研究開発、近未来の ITER の国内誘致の可能性を維持するため地震など我が国固有の立地条件や安全規制に対する準備検討を行うための短期的研究開発、強磁場用超伝導コイル線材や発電用ブランケット開発など原型炉以降をめざした長期的な研究開発などを目的とする。

3) 進め方

ITER 工学 R&D については、延長期間中の活動として、ITER 作業計画で定められた日本の分担に基づき実施する。実施に際し当部は原研内の関連部及び、大学、国公立研究機関、産業界との緊密な連携・協力体制を確保しつつ ITER の開発目標達成を目指す。

炉工学技術の研究開発については、長期的展望に立ち、各テーマの開発段階での重要度を考慮した開発計画を立て、経済性・安全性に優れた社会的受容性に富む核融合炉の構築を図る。実施に際しては、より有機的なネットワークの構築をめざして、原研の所有する試験装置・施設などを可能な限り活用し、大学、国公立研究機関、産業界との共同研究を積極的に進める。また、資金と人材の効率的利用の観点から IAEA、IEA、日米、日 EU などの国際協力を積極的に進め、世界の核融合研究開発の主導的役割を担う。

核融合材料の研究開発については、原型炉以降の構造体に重点を置いた開発と、ITER を対象とした開発について、それぞれ東海研物質科学研究部と那珂研 ITER 開発室が中心となり原研の 4 つの事業所が特徴を生かして協力し研究開発を行ってきたが、研究開発をより統合的、計画的に推進するため、現在東海研所属で開発推進の役割をになう 2

課室を平成 11 年度より那珂研究所に移設する予定である。研究開発の実行にあたっては我が国のポテンシャルをより有効に活用するため、大学等との連携・研究協力を一層強化しながら進めることとする。

4) 主要課題領域

(イ) 超伝導磁石技術(主要課題領域 1)

ITER の建設に必要な大型で高磁場動作が可能な超伝導磁石システム及びこれらの超伝導磁石を -269°C に冷凍するための大型冷凍機の技術開発を実施して、ITER の建設開始に必要な技術を実証する。また、原型炉以降に必要な強磁場コイルなどの基盤技術の研究開発を実施し核融合炉の実現を目指す。

(ロ) 炉構造技術(主要課題領域 2)

炉構造の主要機器である真空容器の製作、分解・組立技術、及びブランケットやダイバータ等の炉内機器の遠隔保守技術を開発・実証すること、及び核融合実験炉の工学的安全性実証のため、トリチウム隔壁を成す二重壁容器の構造健全性及び地震動に対するトカマク機器の免震技術を開発し、我が国の構造設計及び免震設計基準の策定に資する。

(ハ) プラズマ対向機器技術(主要課題領域 3)

ITER のプラズマ対向機器及び原型炉用プラズマ対向機器に係る技術開発を実施して、高熱負荷や中性子等の粒子負荷に耐える高熱負荷受熱機器を実現する。特に定期的な交換が予定されている ITER 用ダイバータについては $5\sim 10\text{MW}/\text{m}^2$ の定常熱負荷、及びプラズマの位置変動等により生じる $20\text{MW}/\text{m}^2$ 、10 秒の非定常熱負荷に3年以上の長期間に亘って耐え得る機器の開発を目指す。

(ニ) ブランケット技術(主要課題領域 4)

ITER の運転期間の前半に装着する除熱と遮蔽の機能を有する ITER 遮蔽ブランケット、及び運転に必要なトリチウムを生産するために運転期間の後半に装着する可能性がある ITER 増殖ブランケットを開発する。

さらに、原型炉で発電の実証を行うための発電ブランケットの実現を目指して、ITER のポートに装着して試験を行う原型炉増殖ブランケット・テストモジュールの開発を行う。

(ホ) 加熱装置技術(主要課題領域 5)

加熱装置は核融合炉において、本格燃焼までの加熱、定常運転のための電流駆動の基本であり、能動的制御手段としても不可欠である。このため、ITER を対象として負イオンを用いた高効率中性粒子入射装置(NBI)及び高効率ジャイロトロンを用いた高周波加熱装置(RF)を開発し、高性能化、大出力化、コスト合理化を図り、50MW 級の技術を確立する。また、将来のプラズマ分布制御・計測用として大出力ミリ波自由電子レーザー(FEL)の基盤技術の進展、及び NBI 開発で培った大出力イオン源技術の応用研究を行う。

(ヘ) 燃料循環系技術(主要課題領域 6)

核融合実験炉の燃料循環系及びトリチウムの安全に係る研究開発を進め、燃料給排気技術とトリチウムプロセス技術を確立するとともに、トリチウムに関して安全な核融合実験炉の実現を目指す。また、トリチウムプロセス研究棟の運転管理を通し、大量トリチウム取扱施設の運転管理技術の確立を図る。

5) 所内外の協力・連携

原研内にあつては那珂研究所内他部との協力は当然のこととして、原研の持つ核工学の知見、蓄積を最大限に活用するため、他事業所と積極的な協力を行っているが、さらに協力体制を強化する。特に耐放射線性材料の開発、構造材料評価、中性子照射特性、廃棄物処理、等の面での協力が不可欠である。

外部機関との協力、連携については、国内の大学側に設けられた ITER/EDA 研究協力委員会を通して引き続き ITER 関連研究の委託を行う予定であるが、ITER 以外の炉工学研究の主要課題についてもより一層の研究協力を推進するため、研究計画の検討・立案への大学の参加を積極的に求めるなど、その体制について外部機関との協議を進め、弾力的な対応を目指す。また、国際的には IAEA や IEA、または日米、日欧などの協力を通して参加極の各研究機関との協力・連携を図りタスクの共同実施、人員交流および情報交換等を積極的に進める。

(2) 評価結果

1) 項目別評価 (()内の数字は評価点数で、5 が満点)

(a) 部の基本的考え方について (4.5)

開発目標がはっきりしてよい。新しいテーマも多いが立派な成果が得られている。しかしながら、研究開発のアプローチや得られている成果は限られた条件下で妥当なものであって、一般性・普遍性はそう高くはないのではないか。これは今後の課題である。

全般的なことであるが、主要課題のそれぞれにおいて、研究目標が定量化、明確化されているのは非常によいが、その実現のための具体的手段、方策が読み取れない。

(b)-1 超伝導磁石技術 (主要課題領域 1)

(i) 目的・意義について (4.8)

ITER タスクにおける開発技術は、大型高磁場パルスマグネットの実現に重要なマイルストーンを築くものであり、高く評価する。今後それらの裕度、安全性に見通しを得ること、原型炉も視野に置いた炉工学的基盤研究を推進することが必要である。また、今までに得られている多くの知見やノウハウを将来に向けて役立つような形で整理する工夫・努力をして欲しい。

(ii) 研究展望及び達成目標について (4.6)

長期的研究開発における CS モデルコイル限界性能試験、遠心式ヘリウム圧縮機開発等は、実験炉建設にも寄与が大きいので、積極的に推進して欲しい。

ニオブ・アルミ導体の開発を行い ITER TF コイルに適用されることを目指しているが、その場合新たな大型の研究開発が必要なかどうか問題になると思われる。

超伝導コイル(絶縁材料を含む)の耐照射性能を高めることにより遮蔽厚が低減でき、核融合動力炉の小型化、低コスト化へつながる。また、プラントの長寿命化の観点からも重要となる。原型炉以降に必要な研究開発の中でそのような観点が入り入れられることを期待する。

(ハ)進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について

大型超伝導マグネットの機器信頼性は非常に重要である。最近では機能分解やフォールトツリー法などによって構造信頼性を高める技術が進んでおり、体系的なアプローチをすることが重要である。

欧州がコイル製作担当であるが、日本独自のニオブ・アルミ線等を開発している。ニオブ・スズの欧州との協力体制が必要である。

有機極限材料研究の位置付けはやや不明確である。

(ニ)予想される成果の波及効果について (4.3)

不思議なことに超伝導が実用化されている例は世界に極めて少ない。核融合での分野が一番進んでいると思うが、もう少し産業応用に有用な技術がもたらされるとよい。dB/dtなどに工夫をすれば、超伝導電力応用に大きなインパクトを与えられられる。

(b)-2 炉構造技術(主要課題領域2)**(イ)目的・意義について (4.6)**

炉の工学的安全性に関する研究では、二重壁容器の構造健全性及び地震動に対する機器の耐震(免震)技術の2つをかがげているが、これで十分か。

ダイバータ、ブランケット、遠隔保守技術等は ITER の先の原型炉(例えば SSTR)を見通して進めて欲しい。

トカマク炉構造は簡素化してもまだ複雑である。商業化になったと仮定して、定期点検、修理に要する日数で稼働率が低くなることが予想される。更なる簡素化を常に念頭において進める必要がある。

(ロ)研究展望及び達成目標について (4.3)

多くのすぐれた成果が着実に得られている。遠隔保守技術など従来に比べれば著しく進展したが、それでも作業の迅速化など実用化の要件を十分に満たしているとは言えないので、さらなる開発が強く望まれる。技術の集約化・普遍化にも工夫がなされるべきであろう。

核融合動力炉の実用化の大きなポイントの一つが保守・補修性にあると考える。まず構造ありき、だけではなく遠隔操作化やロボット化への負担を極力軽減させるような構造設計研究も大事にして欲しい。

遠隔保守技術においては、コストとの関係でどのくらいの期間で何をするのかという目標設定も必要である。

二重壁構造に用いられる特殊溶接に関しては十分な試験・評価が必要であると考えられる。

LBB 概念による検査法と今後の展望にあげられている健全性診断技術の関係が不明である。健全性診断技術に関してより具体的な内容を示して欲しい。

(ハ)進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について (4.1)

二重壁容器の構造健全性に関する特性試験は、具体性に欠け、妥当かどうか分からない。振動応答等の特性試験は、水平、垂直を対象にして、減衰定数等を得ることが必要である。

開発研究の進め方において、企業がどのように寄与し、企業の研究がどのように活用さ

れているかがわかるとよい。

(c) 予想される成果の波及効果について (4. 3)

プログラム化された製作法など立派な成果である。知見の普遍化が行われていると他産業への応用が期待できる。

成果は開発担当企業のみならず、特許、論文等を通じて成果の公表、普及への努力が必要である。

(b)-3 プラズマ対向機器技術 (主要課題領域 3)

(i) 目的・意義について (4. 6)

原研の対向機器は世界トップレベルにあり、ITER の高熱流束を処理できるダイバータを確立することが、ITER 計画の信頼性を高める。

実験炉技術を原型炉へ持っていくことがこの場合できないことも考えられ、新たな研究開発を進める必要があるのではないかと。

(ii) 研究展望及び達成目標について (4. 2)

10MW/m²×3000 回の繰り返し負荷に試験体が耐えたとして満足するのはよくないのではないかと。この大型試験の結果は小型試験の結果から予測できたのであろうか。例えば接合強度の分析・解析などが体系的、一般的になされていないのではないかと。接合強度のバラツキなどが定量的に判っていないと、さらに大型のものを実際に製作したとき不確定要因を残すことになり、開発が効率的でなくなる。

ITER 用ダイバータの、定常熱負荷 10MW/m²への裕度確認の CFC+3 層アルミナ分散強化銅スワール冷却管の技術は、原型炉では代替が必要か。低放射化材のスクリー冷却管はその第 1 候補としてターゲット絞り込みが可能か、数値目標が明確ではない。

(iii) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について (4. 0)

高熱負荷受熱機器基盤技術としてのスクリー冷却管(低放射化)の位置付けが不明確である。中性子照射による伝熱特性の変化にも注意され、コスト低減の観点も重視されたい。

ダイバータ領域のプラズマが期待通りの温度や密度になるか、あるいはコアプラズマの高性能閉じ込めと両立するかに留意する必要がある。

(c) 予想される成果の波及効果について (3. 9)

本当に航空などの他産業へ展開できるのだろうか。装置志向型の研究となっており、成果はあがっているものの一般化がなされていないので、他への応用は限られるのではないかと。

ダイバータに関して、実験炉から原型炉への展望が得られる。高熱流束を処理する冷却技術は応用範囲が広い。

(b)-4 ブランケット技術 (主要課題領域 4)

(i) 目的・意義について (4. 4)

ITER タスクにおける Cu-SUS ブランケット製作技術と原型炉用 F82H ブランケット製作技術、同様にトリチウム増殖材の開発の ITER タスクから原型炉タスクへの連続性、発展性の見通しは、かなり高い。

現在進めているブランケットとともに、それにとらわれない全く新しいものの開発を常

に念頭に置く必要がある。

(D) 研究展望及び達成目標について (4. 2)

F82H の非線形磁気特性は十分に調査してあるのか。プラズマ着火時には温度が高くないので磁性体であり、TF 磁場が大きいので磁気飽和していると思われ、平板と磁場との傾き具合にも依存するが、結構複雑な挙動が見られるのではないか。調査項目が多々あるので気をつけた方が良い。

原型炉用ブランケットの部品レベルでの照射試験も考慮すべきではないか。そのためにも IFMIF が必要と考える。

原型炉への基礎技術開発には、バナジウムや増殖材の多様性、可能性も視野に入れた目標も必要である。

(A) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について (4. 0)

実験的側面が先行している事自体評価されるが、理論的側面にもスポットをあてる必要があるのではないか。例えば接合に関する科学的な定量的側面など。

トリチウム増殖材・中性子増倍材微小球のインパイル機能試験では、増殖材・中性子増倍材中のトリチウムの挙動についての基礎的なデータを持つ他の部門との連携・協力をもっと密にして進めて行く必要がある。

固体増殖方式一本に絞り、工学的大規模の試験へ進める方法に危険を感じる。

(C) 予想される成果の波及効果について (3. 8)

波及効果を考える時、原研の研究開発に参画した会社の対応も重要と思われる。会社内で成果の他分野への応用に関する取り決めなどはどうなっているのか。

低温 HIP 技術、微小球製造技術等の生産技術は波及性が高い。特許、論文の公開により技術の普及に努めて欲しい。

(b)-5 加熱装置技術 (主要課題領域 5)

(I) 目的・意義について (4. 5)

NNBI は将来トカマク炉において不可欠の技術であり、この開発を進めてきた原研の功績は大きい。炉心プラズマで使えるレベルを目指して欲しい。ECRH 用のジャイロトロンは ITER の電流分布制御では必要な機器である。

(D) 研究展望及び達成目標について (4. 4)

着実な進展が見られ高く評価できるが、ITER タスクとして残されている課題がなお多い。資源の分散化に注意して進める必要がある。

ITER 用加熱装置の開発においては、大電流化と高電圧化を同時達成できる見通し、及びその達成手段を、高周波加熱結合系の開発においては、LH 帯、IC 帯でのアンテナ達成の見通し、及びその達成手段を、明確にする。

(A) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について (4. 3)

ビーム応用研究、ミラーアンテナ、IC アンテナ等の開発は大学、国際協力活用による推進を図る。

(C) 予想される成果の波及効果について (4. 1)

目標が明確であるだけに、他への波及効果も大きい。特に、ジャイロトロンの開発は、

人工ダイヤモンド窓などによる進歩が大きい。

(b)-6 燃料循環系技術 (主要課題領域 6)

(i) 目的・意義について (4. 1)

燃料供給システムの目標値がはっきりせず、現在開発中の方法での可能性の評価を明確にする必要がある。

トリチウム工学は未だ十分進んでいない領域なので大いに推進し、特に、安全性に優れ、かつ低コストのトリチウム系の開発をターゲットとされたい。さらに、安全性は核融合炉の社会的受容にも影響が大きい。

(ii) 研究展望及び達成目標について (4. 1)

実験炉に必要な技術と原型炉で必要となる技術との関係が判らない。外挿できるようソフト面や理論面にも着目して開発を進めて欲しい。

示されている達成目標の位置付けが分かりにくい。例えば、ペレットおよびコンパクトトロイドの多発化/高速化(それぞれ 5km/s、数百 km/s)とあるが、これらは ITER で要求値なのか、原型炉、動力炉での要求値なのか、不明である。

トリチウム工学のうち、水処理システム、ブランケットトリチウム回収システム等が ITER タスクに入らないのは他極で行われている分担のためか。本来 ITER にも必要である。

(iii) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について (3. 9)

トリチウム安全工学に関する研究の中で示されたプラズマ対向材料等のトリチウム透過・滞留等の研究及びデータベース化は、ブランケット開発研究や冷却水処理システムに大きな影響を及ぼすものと考えられ、これらを精力的に進められることを期待する。

トリチウム安全工学の推進は ITER 建設への鍵ともなり得る。社会的容認の根拠となる基本的データの取得と安全確保への見通しは平成 13 年度までに完了が必要である。

トリチウム施設の実験は数 g のオーダーで行われている。ITER では kg オーダーを取り扱うが、ITER 以前にこのような量を取り扱うことはできない。外挿性も重要なファクターになると思う。

(iv) 予想される成果の波及効果について (3. 6)

トリチウム工学、トリチウム安全工学は波及効果もさる事ながら、安全確保、信頼性実証への見通しを社会に与える意義の方が大きいことを認識して進めるべきである。

(v) 資源(予算、人員等)配分について (3. 9)

予算作成の際は実際にどのくらいの費用が掛かるものか、産業界の経験などを参考にし、適正予算の確保が望まれる。

ITER タスクへの重点配分は徹底している。今後安全性工学、研究開発の体系化に向けた傾斜配分も必要である。

予算が超伝導、ブランケット、加熱装置およびトリチウムに重点的に配分されるのは適切であるが、職員数は計画の規模に比べて少ないと感じる。

(vi) 原研他部門との協力・連携について (4. 2)

核融合工学の研究開発では、システム的研究、統合的研究が非常に重要と考える。関係

部門と密接な連携のもとに実施してほしい。

ブランケットはシステムインテグレーションが必要であり、更に他部門との連携を。トリチウムは安全研究が中心となるので、原研・安全研究の総力をあげて取りこんで欲しい。

(e) 外部機関との協力・連携について (3.7)

我が国における核融合研究は、実質上、原研が突出している。大学等の他の機関の力を借りることと養成の意味から、他機関との実質的な協力・連携を強化するとともに、産業界との協力、民間の養成にも十分配慮して欲しい。これを具体化するための具体的な施策が欲しい。

(f) 人材養成の施策について (3.5)

養成に向けた具体策の提案に乏しい。核分裂炉と核融合炉の接点になる技術開発があることを意識しつつ、大学との協力、産業界も考慮に入れて人材養成を考えるとよい。

(g) 上記以外の評価項目について

炉制御やトータルなエネルギー活用システムの研究項目が必要であると思われる。

2) 総合所見(所感、問題点、提言、等)

得られている多くの成果は、目標達成型の開発に合致しており目標は概ね達成されているか、されつつあり、着実に成果が挙がっていると高く評価される。しかしながら、これらの成果は一定の条件の中での立派な成果であって普遍性に欠ける。その理由としては、①異なった条件下での予測性能が不十分であること、②多くの条件をカバーすることに関する横の拡がりに欠けること、③多くの弁別的な要素の統合的な結果である現象の中にミクロとマクロをつなぐ要因を発見しようとするアプローチが見られないこと、などが挙げられる。これらは体系化の努力の欠如と言える。技術の開発と体系化が、車の両輪であって、研究開発の効率化と大きな進展の要因となるものである。体系化のためには、大学の研究者との実のある協力が必要である。NIFS における ITER/EDA 研究協力会議の成果は、この視点に立てば実効が挙がっているように見えない。これなどは早急に改善すべきであろう。なお、国公立研究所との研究協力の問題については、金材研など材料開発や超伝導材などの開発に強い興味を持っている所と共同研究によって実効が挙がる場合には、積極的に推進すべきではないのだろうか。今の所、どこに原因があるか判らないが、国公立研と原研との共同研究は有効機能していないのではないか。

核融合動力炉が実用化できるための大きなポイントの一つが、保守・補修性にあると考える。原子力発電所とは異なり、作業の遠隔操作化、ロボット化は必須である。ITER 工学 R&D の成果をもとにした迅速かつ高度な保守・補修の概念の創出とともに、遠隔操作化やロボット化への負担そのものを極力軽減させるような構造設計を創出する研究も重視して欲しい。

実機を目指した研究開発を多く含むことから、人員構成からみて企業との密接な協力の下で研究開発を行っているようであるが、超伝導技術、遠隔操作技術、加熱装置技術の一部など、ハイテク・汎用技術として企業が注目する分野にあっては、原研研究者が直接関与することが最善であるとしても、核融合研究開発を構成する企業群の裾野を広げる意味

から、今まで以上に思いきった企業委託を含む研究開発システムが考えられないか。長期研究戦略について言えば、将来の核融合炉について想定する炉のイメージを明確にしないまま研究開発を行っているように見える。例えば、材料開発が核融合炉成立可能性に対する決定的要素であることである。

超伝導、ロボット、対向壁、加熱の分野では卓越した成果を挙げており、今後も目標を達成して行くことを望む。要素技術として、ブランケット、トリチウムサイクルが未踏の分野であり、これらの実現性を高める必要がある。

全体的に適切な目標と計画であるものの、安全研究がやや薄くなっていないか心配である。産業界との協力は原研よりの一方通行にならないように。原型炉を見通しての ITER であるという視点が必要である。

実験炉が成功しないと原型炉はない。ITER は国際協力で進められるが、日本の企業の技術力の向上に寄与することも大切であるので、国際協力の枠組みの中で、産業界をうまく誘導して、国産の核融合炉を目指すことも必要である。安全対策としては、地震対策も必要であるが、トリチウムの取扱いが重要である。

項目別評価の評価点をまとめたものを表 2 に示す。

表 2 核融合工学部の事前評価対象研究開発課題の評価結果
(含む高崎研究所材料開発部極限材料研究室、大洗研究所材料試験炉部ブランケット照射
開発室及び東海研究所エネルギーシステム研究部高温材料強度研究室)

評 価 項 目	評価点 (5点満点)
(a) 部の基本的考え方について	4.5
(b)-1 超伝導磁石技術 (主要課題領域 1)	
(i) 目的・意義について	4.8
(ii) 研究展望及び達成目標について	4.6
(iii) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について	4.2
(iv) 予想される成果の波及効果について	4.3
(b)-2 炉構造技術 (主要課題領域 2)	
(i) 目的・意義について	4.6
(ii) 研究展望及び達成目標について	4.3
(iii) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について	4.1
(iv) 予想される成果の波及効果について	4.3
(b)-3 プラズマ対向機器技術 (主要課題領域 3)	
(i) 目的・意義について	4.6
(ii) 研究展望及び達成目標について	4.2
(iii) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について	4.0
(iv) 予想される成果の波及効果について	3.9
(b)-4 ブランケット技術 (主要課題領域 4)	
(i) 目的・意義について	4.4
(ii) 研究展望及び達成目標について	4.2
(iii) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について	4.0
(iv) 予想される成果の波及効果について	3.8
(b)-5 加熱装置技術 (主要課題領域 5)	
(i) 目的・意義について	4.5
(ii) 研究展望及び達成目標について	4.4
(iii) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について	4.3
(iv) 予想される成果の波及効果について	4.1
(b)-6 燃料循環系技術 (主要課題領域 6)	
(i) 目的・意義について	4.1
(ii) 研究展望及び達成目標について	4.1
(iii) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について	3.9
(iv) 予想される成果の波及効果について	3.6
(c) 資源(予算、人員等)配分について	3.9
(d) 原研他部門との協力・連携について	4.2
(e) 外部機関との協力・連携について	3.7
(f) 人材養成の施策について	3.5

3. 2. 3 物質科学部 核融合炉材料研究開発推進室

(含む高崎研究所材料開発部極限材料研究室、大洗研究所材料試験炉部ブランケット照射開発室並びに東海研究所物質科学研究部照射解析研究グループ及び核融合中性子工学研究室)

(1) 研究計画の概要

1) 目的

「第三段階核融合研究開発基本計画」で定められている材料開発の方針「高いフルエンスの中性子照射に耐え得る構造材料、ブランケット材料、計測・制御機器及び低放射化材料の開発を進めるとともに、中性子照射による材料特性等のデータの蓄積を行う」に従い、原研内の関連部課室及び所外の研究機関との連携を図りつつ、原型炉以降の構造材料とトリチウム増殖関連材料を開発する。同時に、材料開発に必要な核特性の評価研究及び国際核融合材料照射施設(IFMIF)の開発を進める。

2) 達成目標

構造材料開発では、これまでに開発した低放射化フェライト鋼(F 82H)の改良と高温強度をさらに高めるために酸化物分散強化型フェライト鋼を開発する。並行して高温使用と低放射化性に優れた先進材料の可能性を探る。トリチウム増殖材料の開発では、原型炉用トリチウム増殖材の微小球製造仕様を決定するとともに、中性子増倍材料の開発では、これまでに確立した微小球の工学的製造法の最適化を図る。核融合中性子工学では、IFMIFの建設に必要な要素技術を確認するとともに、照射施設として必要な長時間安定運転を実証するための試験設備を整備する。また、ITERの建設に必要な核特性のデータを取得するとともに、原型炉の増殖ブランケット等に関する核特性を明らかにする。

3) 進め方

構造材料及びトリチウム増殖関連の材料開発研究では、低放射化材料の開発を主目的として、長期的展望に立って計画的に材料開発を進める。実施に際しては、国内の大学との協力関係を主軸として、国公立研究機関、産業界との協力研究を積極的に進める。また、資金と人材の効率的利用の観点から、IAEA、IEA、日米などの国際協力を有効に活用する。核融合中性子工学の研究では、IFMIFの開発研究とITERの建設及び原型炉の増殖ブランケット等に必要な核特性の評価に関する中性子工学の開発研究を進める。IFMIFの開発は、国内の大学及び産業界との協力を軸にIEA協力で実施しているIFMIF計画に積極的に参加して進める。中性子工学の研究では、ITER関連の研究については日本の分担に基づき実施し、原型炉関連ではIEA協力を中心として進める。

4) 主要課題領域

(イ) 核融合炉材料に関する研究計画の推進・調整(主要課題領域 1)

材料の開発計画の策定とその推進。

(ロ) 構造材料(主要課題領域 2)

原型炉以降のブランケット構造材料の研究開発。

(ハ) トリチウム増殖関連材料(主要課題領域 3)

原型炉以降のトリチウム増殖材料と中性子増倍材料の研究開発。

(c)核融合中性子工学(主要課題領域 4)

国際核融合材料照射施設(IFMIF)の開発研究と 14MeV 中性子に対する核特性の評価。

5)所内外の協力・連携

材料の開発研究そのものは那珂研究所核融合工学部及び ITER 開発室と密接な連携を取りながら、大洗研究所ブランケット照射開発室、高崎研究所極限材料研究室と共同で推進する。中性子照射実験では、各研究所にある研究炉(JMTR、JRR-3)やイオン照射施設(TIARA)側と協力して進める。中性子照射実験のうち重照射実験では、米国のオークリッジ国立研究所(ORNL)と資金及び人材の共同出資による共同研究を実施して照射実験の効率化を図る。また、IEA「核融合材料に関する研究開発計画のための実施取り決め」に積極的に参加し、特に低放射化フェライト鋼に関するラウンドロビン試験において主導的な役割を果たすとともに、国際的知識を積極的に活用する。さらに、材料開発では、メーカーの協力を得てこれまでに培ったノウハウを利用すると同時に、大学、国研と協力して材料開発研究に適宜最新知見を注入し研究の効率化を図る。

核融合中性子工学では、中性子源の開発については IEA「核融合材料研究開発実施取り決め」で進められている IFMIF 計画に積極的に参加して米・露・欧と協力して IFMIF の開発研究を行う。国内の研究協力に関しては、核融合炉工学の開発で培ったイオン源及び高周波源等の技術力を有する核融合工学部、高速流体取り扱い技術力を有する原子炉安全工学部、線型加速器を開発中の中性子科学研究センター、液体リチウムループを有する大阪大学工学部等と協力して、効率の良く研究開発を進める。14MeV 中性子に対する核特性の評価研究に関しては、ITER 関連の研究開発を ITER 開発室、炉心プラズマ研究部と協力して進める。また、原型炉に向けた開発研究は、IEA「核融合炉工学に研究開発実施取り決め」サブタスク「中性子工学」の研究協力を中心として国内の大学の研究者の参加も得て進める。

6)その他

核融合炉材料研究開発推進室及び核融合中性子工学研究室は平成 11 年以降、那珂研究所核融合工学部に移設予定である。

(2)評価結果

1)項目別評価 (()内の数字は評価点数で、5 が満点)

(a)基本的考え方について (4.2)

低放射化でかつ耐放射性に優れた構造材料の開発は、核融合炉の実現で最も重要な課題である。この低放射化材料の研究開発を本格的に推進して行く計画は大いに評価できる。

フェライト鋼と先進材料開発の間には温度差があつてよい。また、構造材料に比べてブランケット材料研究のウェイトは、その重要性を考えると、差があつてよい。IFMIF では関連する技術開発が重要である。

(b)-1 核融合炉材料に関する研究計画の推進・調整 (主要課題領域 1)

(i)目的・意義について (4.1)

目的、意義は適切と判断されるが、具体的テーマの選定に当たっては、大学連合ではなく、大学研究者やそのネットワーク等と広く連携して進めて欲しい。

(d) 研究展望及び達成目標について (4. 1)

材料開発は原研全体が関与する姿勢は適切である。特に照射実験では、核分裂炉の経験を生かして効率よく進める必要がある。

構造材料に重点を置くべきでないか。

IFMIF での実験は原型炉のための材料試験としては遅い。IFMIF に頼らなくても外挿できることがあるなら、材料開発に反映して欲しい。

(h) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について (3. 7)

取り上げる対象の選定方針が不明である。実現性が高いシステムを追求するなら、なぜ SiC/SiC が加わっているのか。先進的なシステムも小規模で行うなら、なぜバナジウム合金や液体ブランケットが全く無いのか。

IFMIF の意義は理解できるが、ITER がペンディングになっている状況下で、建設を実現するための戦略を考える必要がある。また、IFMIF の建設が遅延したときの対策も考慮すべきではないか。

材料利用技術開発(実験炉)と新材料開発(原型炉)は一本化して、行う方が良い。また、材料研究に数値シミュレーションが活用され始めているので、取り組んで進めて欲しい。

(b)-2 構造材料 (主要課題領域 2)

(i) 目的・意義について (4. 4)

「現状では適合する構造材料は存在しない」との認識に立っていることを高く評価する。耐照射性 $\sim 100\text{dpa}$ 、耐熱流動性 $\sim 2\text{MW/m}^2$ でしかも低放射性を満足する材料を目指すのは適切である。

F82H 鋼の開発は大変重要であり評価できるが、三大候補材のひとつであり米国では最も予算が配付されているバナジウム合金について全く活動が無いのはなぜなのか。バナジウム合金を全く評価していないのか、あるいは大学や国際協力で責任分担をしているという考えか。

(d) 研究展望及び達成目標について (3. 9)

F82H 鋼については、他のマイナー成分を変えた材料との比較検討を照射まで含めて行う活動が少なすぎる。また磁気特性の研究も十分ではない。F82H 鋼の完成への活動と並行して体系立てた活動をもっと行うべきである。また、核融合炉における他の面からの評価(例えばトリチウムとの相互作用など)についてのデータベースの充実も必要である。

ITER とその先の SSTR で異なった材料を使うよりは、できるだけ同じ物が使えた方が良い。特に低放射化は ITER においても必要と思われる。

(h) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について (3. 8)

材料研究の常として、必ずしも予期した研究期間内で研究目標を達成できる保証はないから、リスクを減らす上からも、原研研究所間の研究協力を進めるとともに、特に先進材料については、企業、大学、国研との研究開発協力を積極的に行うことが必要である。

フェライト鋼(F82H 鋼)は原研が開発してきた材料であるが、SiC 複合材等も並行して

進め、核融合炉の構造材料として使い分けるのがよい。

損傷量の予測技術とか測定技術の開発という視点が不十分である。

(c) 予想される成果の波及効果について (4. 0)

ODS、SiC に他の用途への共同開発が考えられるが波及性は少ない。これは仕方のないことで、核融合炉開発の成否性、社会的需要性に係わる課題として認識するべきである。また、損傷診断技術など波及効果の大きい研究を併せて追求できる筈である。

低放射化構造材を確保すれば D-T 核融合炉の社会的受容性が一層高くなる。

(b)-3 トリチウム増殖関連材料 (主要課題領域 3)

(i) 目的・意義について (4. 2)

「トリチウム増殖材料はリチウムを含有するセラミックスであり」との記述があるが、増殖材料としては液体金属等、他にも可能性の大きいものがある。原型炉以降の核融合炉については他の増殖材料の可能性の追求も重要である。

液体リチウム技術が原研に無いことが日本の研究を歪めており、IFMIF の推進にとっても不幸なことである。

トリチウム増殖材と中性子増倍材として既に材料が選ばれているのは心強い感じがする。

(ii) 研究展望及び達成目標について (4. 2)

トリチウム増殖材料(特に、 Li_2TiO_3)の照射特性を把握することは重要であるが、照射下でのトリチウムの放出特性のみでなく、基礎的な物性(例えば、化学的安定性、熱的特性)に関するデータの蓄積が望まれる。また、中性子増倍材についても同様である。

材料開発の大きな問題が照射実験にあるので、既存の施設を出来る限り活用することが重要である。原型炉での使用を考えた時、必要となる性質には両立性、コスト、質量移行、等がある。総合的な見地からの目標とすべきである。

(iii) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について (3. 7)

現在進めているテーマを推進することは必要であり、当然であるが、別の方法が無いかを常に考え続けることが必要である。

照射量の高い中性子照射を行う方策を立てる必要がある。海外炉の利用や JOYO の活用などもっと積極的に進めて欲しい。

(c) 予想される成果の波及効果について (3. 6)

波及分野は少ないが、それが重要な評価ファクターとは思えない。

核融合炉の実用化に対して、波及効果は大である。

最終的にはトリチウム生産実験を行わないと評価が決まらないので、時間のかかる開発研究である。ITER と IFMIF が並行して進められると効果が大きくなる。

(b)-4 核融合中性子工学 (主要課題領域 4)

(i) 目的・意義について (4. 0)

IFMIF の開発を主目的の一つにしている事は適正であるが、IFMIF の必要性を明確にする必要がある。FNS での研究についても、具体性と重要性が認められる。

(ii) 研究展望及び達成目標について (3. 7)

IFMIF、ITER 許認可データ取得とも計画より早める必要があるのではないか。

IFMIF 関連技術は重要なものが多いので十分に計画を立てて、成果が出るようやって欲しい。遮蔽実験では目標とする精度の説明がやや不十分。中性子工学に関連して、何の研究が遅れているのかの整理が見えない。

研究課題に展望なり新規性が感じられない。何か付加価値の高い研究課題はないのか。

IFMIF のための達成目標をオープンにして、大いに議論することが重要であろう。

(h) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について (3.7)

IFMIF で許認可データ取得までを範囲に広げているが、どのようなデータが必要なのか整理が見えない。

現状では、実際に使える FNS を活用するのは適切である。また大学には中性子物理の研究者も多いので協力することが大切である。

(i) 予想される成果の波及効果について (4.1)

資料に書かれていることは正しいが、液体リチウムについて具体的な動きが見られない。液体ブランケットについて、この部分の記述と実際のブランケット研究とが対応しない。

IFMIF の加速器以外の技術は液体ブランケットそのものである。

(c) 資源(予算、人員等)配分について (3.7)

研究計画にはよく合っている。しかし先進材料の開発がこの程度の予算なら原研が行う必要があるのかが疑問である。基礎基盤研究の一環として欲しい。大学に開発責任を委ねた方が良いのではないか。

バナジウム合金に対してより予算とマンパワーを配分して、開発と評価をして頂きたい。

(d) 原研他部門との協力・連携について (3.8)

トリチウム増殖関連材料の研究ではブランケット設計との連携とともに、トリチウムの取扱いや基礎的な挙動に関する研究を実施している部門との連携も重要である。

原研では材料開発に関係する部門が多いので、うまくコーディネートすれば効果が挙げられると思われる。構造材料の効率的推進を望む。

(e) 外部機関との協力・連携について (3.7)

核融合科学研究所に来年度から炉工センターが新設される。又大学関連の研究者も多いので日本での炉材料研究のネットワーク作りを行い、日本での研究の組織化を図るとよい。また、産業界からの積極的な支援を考えるべきである。大学との適切な連携があれば、バナジウム合金や液体ブランケット研究を行っていない事が、異なる結論になったかもしれない。

(f) 人材養成の施策について (3.6)

放射線関連の技術者の育成は原研の大きな義務であり、許認可データ取得に関する専門家養成が必要である。そのためには核融合分野での独立した推進組織が必要と思われる。

核融合炉の材料開発を原研だけで行うのは不可能であり、大学と企業の協力は欠かせない。特に人材養成には大学との研究協力は有効である。

(g) 上記以外の評価項目について

材料関係のデータベースがあれば大変便利でありかつ今後の研究に有益であると思われる。炉材料関係のデータベース作成又は既にあるデータベースを研究者が利用できるよう

なシステム作りを提案したい。

2) 総合所見(所感、問題点、提言、等)

中性子照射データ取得、ITER 許認可に必要なデータ取得は遅れている感じを受ける。いずれも必要が生じた時集中的に行えばすむという性質のものでないので、着実な取り組みを必要とする。

材料グループ、中性子工学グループが那珂研へ移るのをよい機会として、研究実施体制と内容の充実を図ることが重要である。

将来の核融合動力炉の実現に対しては、耐照射性、低放射化性に優れた材料が開発されるかどうかはその死命を決するとも考えられる。地道、堅実な従来からの延長の研究とともに、計算科学、計算材料科学を応用したような革新的な研究にも取り組んで欲しい。また、IFMIF は本来 ITER とは独立しており、核融合研究にとっては必須であると考えられる。いろいろと難しい情勢ではあるが、IFMIF をもっと表に出すことも考えて欲しい。IFMIF の工学技術はミニ核融合炉の意気込みで取り組んで欲しい。

研究対象に応じて、柔軟な外部協力体制をとるのが効果的ではないか。例えば、長期的研究課題について、大学、国研の活用、プロジェクト形式で行える部分は企業の活用、原研の施設を常時使用する部分については原研内部の協力体制の強化などを考えて欲しい。

低放射化構造材料の開発は時間を要すると考えられるが、この分野では多くの研究者が大学にいるので基礎を分担してもらうような体制作りも必要である。

核融合炉の構造材として、フェライト鋼が最も有望なのかをできるだけ早い時期に確認する必要がある。現在の材料開発のペースであれば、ITER と原型炉は異なった材料を使うことになるが、建設に際し問題にならないか。

項目別評価の評価点をまとめたものを表 3 に示す。

表3 物質科学研究部 核融合炉材料研究開発推進室に係わる
事前評価対象研究開発課題の評価結果

(含む高崎研究所材料開発部極限材料研究室、大洗研究所材料試験炉部ブランケット照射開発室並びに東海研究所物質科学研究部照射解析研究グループ及び核融合中性子工学研究室)

評 価 項 目	評価点 (5点満点)
(a) 基本的考え方について	4.2
(b)-1 核融合炉材料に関する研究計画の推進・調整 (主要課題領域 1)	
(i) 目的・意義について	4.1
(ii) 研究展望及び達成目標について	4.1
(iii) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について	3.7
(b)-2 構造材料 (主要課題領域 2)	
(i) 目的・意義について	4.4
(ii) 研究展望及び達成目標について	3.9
(iii) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について	3.8
(iv) 予想される成果の波及効果について	4.0
(b)-3 トリチウム増殖関連材料 (主要課題領域 3)	
(i) 目的・意義について	4.2
(ii) 研究展望及び達成目標について	4.2
(iii) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について	3.7
(iv) 予想される成果の波及効果について	3.6
(b)-4 核融合中性子工学 (主要課題領域 4)	
(i) 目的・意義について	4.0
(ii) 研究展望及び達成目標について	3.7
(iii) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について	3.7
(iv) 予想される成果の波及効果について	4.1
(c) 資源(予算、人員等)配分について	3.7
(d) 原研他部門との協力・連携について	3.8
(e) 外部機関との協力・連携について	3.7
(f) 人材養成の施策について	3.6

3. 2. 4 炉心プラズマ研究部

(1) 研究計画の概要

1) 目的

原子力委員会が策定した「第三段階核融合研究開発基本計画」に基づき、大型トカマク装置 JT-60 と JFT-2M を駆使した実験・解析研究、プラズマ理論シミュレーションの研究及び定常トカマク核融合炉概念の確立、等を総合的に推進し、以下の研究課題を中心とした炉心プラズマ技術の研究開発を行う。

(イ) 中核装置 JT-60 によるプラズマ閉じ込めの高性能化及び定常化に係わる研究開発

(ロ) 実験炉の設計・製作・運転に必要な炉心プラズマ物理データの提供と研究開発

(ハ) 原型炉の概念の発展とその物理的基盤の確立のために必要であり、かつ実験炉だけでは充分解明あるいは実証できない炉心プラズマ技術分野の課題に対する先進的・補完的な研究開発

2) 達成目標

(イ) ITER の長時間燃焼の最適化や定常トカマク核融合炉の基礎データを取得するため、定常運転と整合する先進的運転方式のもとに、高ベータの安定保持技術、高密度化技術ならびに各種プラズマ制御の統合化技術を開発する。これらを集約して、高ベータ、高密度、高性能閉じ込め、高割合非誘導電流駆動、粒子制御、高効率燃料供給等の面で炉心プラズマとして整合のとれた高性能プラズマの実証を目指す。

(ロ) 経済性と環境受容性に優れた定常トカマク核融合炉(原型炉、実証炉、動力炉)概念の確立に必要な炉システムの設計研究を進める。これに基づき、定常トカマク炉で必要となる炉心プラズマ技術及び装置技術に関して先進的研究開発を実施する。

3) 進め方

ITER 計画の実現及び定常トカマク核融合炉の開発に向けて、閉じ込め高性能化、トカマク定常化、及びこれらを統合化するための高性能閉じ込めの定常化手法の開発を主要課題とする炉心プラズマ技術の研究開発を、JT-60 と JFT-2M における実験・解析研究、理論的研究、炉システムの研究、等を国内外との広範な研究協力により、包括的かつ効率的に推進する。

(イ) JT-60 においては、高い核融合エネルギー利得を有する準定常完全電流駆動プラズマの実現、負磁気シア高性能プラズマの定常維持、高ベータプラズマの長時間定常維持、先進燃料補給による高性能プラズマの高密度化等の基盤的研究を進めるとともに、先進的なプラズマ制御に必要な整備を行い、定常核融合炉が満たすべき炉心プラズマ性能を生成及び定常維持するための制御技術の確立を目指す。JT-60 主要機器の老朽化への対応と長パルス・準定常運転でなければ解決できない炉心プラズマ定常化技術開発課題への取り組みに向けて、ITER の動向に応じて研究計画に弾力性をもたせつつ、JT-60 トロイダルコイル等の改修・改造に着手する。

(ロ) JFT-2M においては、低放射化フェライト鋼を用いる先進材料プラズマ試験を実施するとともに、国立研究機関・大学等との緊密な研究協力の下に、閉じ込め高性能化研究を

を進める。得られた先進的プラズマ技術を総合化してフェライト鋼製真空容器で「原型炉で想定する高性能プラズマ生成」を目指す。

(ハ)理論的研究においては、第1期 NEXT 研究として、モジュールコードの開発、計算手法の高度化、統合手法の開発等の基盤整備を進め、これらの成果を基に第2期 NEXT 研究では本格的なトカマク数値実験を行う。

(ニ)炉システム研究開発については、核融合炉実現に至るまでの研究開発課題の抽出、及び安全性評価手法の開発を進め、社会的受容性に優れた革新的な定常トカマク核融合炉概念の創出を目指す。

4)主要課題領域

(イ) JT-60 による炉心プラズマ高性能化技術の開発研究(主要課題領域 1)

炉心級のプラズマを生成する JT-60 において、①高ベータプラズマの安定保持技術の確立、②高閉じ込めプラズマの高密度化技術の確立、③高性能閉じ込めの定常化手法の確立、④高性能プラズマの物理特性の解明と高度計測装置の開発、⑤定常炉心試験装置の高度化設計を行う。

(ロ) JFT-2M による先進的プラズマ技術の開発研究(主要課題領域 2)

JT-60 実験に先行して、あるいは、JT-60 での実施が困難な課題を補完して、炉心プラズマ技術の先進的研究開発課題である、①先進材料プラズマ試験、②閉じ込め高性能化・高ベータ化研究に取り組む。

(ハ)理論研究による炉心プラズマ物理の体系化(主要課題領域 3)

最新の計算科学手法を積極的に取り込んだ数値トカマク実験計画(NEXT 計画)を組織的に推進し、①輸送特性に関する理論研究、②MHD 特性に関する理論研究、③ダイバータ特性に関する理論研究を行う。

(ニ)革新的炉概念の開発研究(主要課題領域 4)

原型炉やそれ以降の核融合炉に求められる社会的要請を充分踏まえた定常トカマク炉の在り方を明確に示すために、①革新的炉概念の構築、②核融合炉における安全評価技術の開発、③核融合エネルギーの多様な利用に関する検討を行う。

5)所内外の協力、連携

那珂研究所他部をはじめ原研内関連部署と密接な連携のもとに炉心プラズマ研究開発を進める。JFT-2M において大学・研究機関等との共同実験班を組織し、研究協力を強化する。JT-60 では、国内の大学・研究機関の研究参加を促進し、各種委員会での研究計画の審議等の幅広い議論を進める。研究協力者、連携大学院学生、特別研究生や夏期実習生等の受け入れを一層拡充する。

IEA 三大トカマク協力計画と日米核融合協力(DIII-D 計画等)を中心に、その他、日米核融合協力、日・EU 協力、日・露協力、日・中協力等を進め、国際的にも効率的な役割分担の下での研究推進に努める。三大トカマク協力に基づき JET との協力により DT 実験に関する実験・解析結果に関する知見を蓄える。また、DIII-D 装置において、相互に実験計画立案段階から検討に加わり先進トカマク概念の開発研究を進める。さらに、これまでの研究者・技術者の相互派遣に加え、計算機ネットワークを用いた遠隔研究協力を、日

米核融合協力をはじめとする他の国際協定の研究機関にも順次拡大していくとともに、実施内容についても積極的に発展させていく。

(2) 評価結果

1) 項目別評価 (()内の数字は評価点数で、5が満点)

(a) 部の基本的考え方について (4.4)

世界の核融合研究を先導してきた炉心プラズマ研究は高く評価され、今後の研究展望や進め方などは適切と考える。ただし、対象が ITER なのか、原型炉なのか、あるいは将来の動力炉なのかなど個々の研究のターゲットが明確には読み取れない。炉心プラズマの個々の性能の向上、チャンピオンデータの獲得は非常に重要であるが、それらを同時達成し、小型、低コストの炉心を実現させるための研究シナリオが欲しい。また、JT-60 は必要な改造改修を加えて今後もいろいろな成果が期待できるものと考え、是非その具体化に向けて戦略を考え、実現させて欲しい。さらに、ITER がペンディングの状態においては、核融合工学部と協力して実質的に他のオプションも十分検討しておく必要がある。

(b)-1 JT-60 による炉心プラズマ高性能化技術の開発研究 (主要課題領域 1)

(i) 目的・意義について (4.4)

定常トカマク核融合炉概念の確立等を総合的に推進し、JT-60 においては高性能閉じ込めの定常化手法の確立に向けた実験を行うことは適切である。高性能化と定常化を高密度プラズマ領域で達成するのは容易ではないが、その結果が ITER や SSTR に反映するので頑張ってもらいたい。

(ii) 研究展望及び達成目標について (4.2)

高閉じ込め、高ベータなどの個々のプラズマ性能向上だけではなく、まずこれらの ITER のパラメータでの同時達成に向けた研究に力を入れて欲しい。研究成果が ITER 設計に直接役立つようにすべきである。 β_N が 3 程度では経済性のある動力炉は難しいと考える。さらに β_N を高めるために、高 β_N プラズマの安定化シェルの研究をして欲しい。

JT-60 実験結果は素晴らしいが、それを物理的に解釈するのに強力な武器となるべき NEXT 計画は相対的に弱い。大学でも研究者は限られているが、他の原研の組織を強力に動員し、現象・実験結果予測できるようになれば、原研と核融合研究全体の威信も揚がるであろう。

特に炉で電流駆動ができることを実証するデータを得て頂きたい。これは核融合研究を続けて行くための一つの重要な要件である。

(iii) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について (4.2)

例えば、JT-60 の W 型ダイバータでは限界があるのか、シミュレーションでその最適な形を追求し、JT-60 の改造方向を追求するというふうに進展すべきである。

JT-60 は、長期にわたり成果を上げてきたが、装置としては経年変化が問題になってくるように思える。したがって、パラメータの向上よりは、無衝突プラズマにおける物理の研究という位置付けで、アカデミックな成果を目指すことも必要であろう。

(iv) 予想される成果の波及効果について (4.2)

応用やプラズマ理論への波及効果は大である。

内部輸送障壁の物理が解明でき、高性能化と定常化が両立できれば、ITER に対してだけでなく、SSTR へも良い影響を与える。

(b)-2 JFT-2M による先進的プラズマ技術の開発研究 (主要課題領域 2)

(イ) 目的・意義について (4. 3)

JT-60 と相補的に行う、JT-60 実験、ITER 物理 R&D、原型炉設計の基礎となるデータを提供することは適切である。例えば、フェライト鋼によるリップルの低減やコンパクトトロイド入射により、先進的なプラズマ研究を目指すことは評価できる。

(ロ) 研究展望及び達成目標について (4. 2)

フェライト鋼を使用するための先進材料プラズマ試験計画においては、リップル低減試験、プラズマ適合性試験、本試験とステップを踏んだ計画となっているが、本試験をもっと早急に実施することができないか。これはフェライト鋼路線を確固としたものとするために必須であり、これが JFT-2M の使命と考える。低放射化フェライト鋼については、磁気特性に及ぼす諸因子(温度、磁場飽和、中性子照射、形状効果、等)の効果について、徹底して調べておく必要がある。他のテーマは例えば、トロイド入射にしても一步一步実験を積み上げていく必要がある。

JFT-2M は、プラズマ物理として興味ある成果を出してきた装置であるので、これからも物理の解明は、重視してもらいたい。

(ハ) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について (3. 9)

テーマがバラバラに設定されている感がある。また、コンパクトトロイド入射は、将来の核融合炉でも必要かどうか、などの評価がはっきりしない点がある。

(ニ) 予想される成果の波及効果について (3. 8)

例えば、JFT-2M で負磁気シア配位が電流駆動により実現できれば、同様のプラズマを JT-60 で研究すれば、スケーリングがわかる可能性もあり興味深い。フェライト鋼によるリップル低減も ITER で活用される可能性が高い。

(b)-3 理論研究による炉心プラズマ物理の体系化 (主要課題領域 3)

(イ) 目的・意義について (4. 0)

NEXT プロジェクトの成果は興味深いのが、何がどこまで予測できるようになったのか。これからどこまで進展するのかその見通し、体系化と現象解明と予測性との関係はどう理解するのかを明確にする必要がある。また、大規模計算のためのコード開発が強調されすぎているように思える。

数値計算のみに重点を置かず、炉心プラズマを直観的に説明する物理が重要であり、これの発展を期待する。何故なら、専門外あるいは一般の人が理解できないのなら、核融合研究の支持者は増えない。

(ロ) 研究展望及び達成目標について (3. 9)

数値トカマク実験(NEXT)は、展望・目標を他の研究者(大学等)と協同してやるのが容易なので大いに推進することも必要である。

実験と理論の比較研究という観点が少ないように見える。物理を確立するためには実験

結果から何が本質かを見抜いて、理論と比較する姿勢をもつことが大切である。

(A) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について (4. 1)

原子過程を取り入れた不純物粒子シミュレーションと主プラズマとの総合化モデルの開発は今後重要となると思われる。積極的に進めて欲しい。

MHD の安定性解析理論の構築が急務である。

進め方は適切であるが、研究者の不足が感じられる。

(C) 予想される成果の波及効果について (3. 9)

天体物理、太陽物理、レーザープラズマ等他分野にシミュレーションコードが適用できることは、コードが一般的であるという意味でもよいことである。

科学の他分野への波及のみならず、直観プラズマ物理をつくり、核融合プラズマを多くの人々に理解してもらう効果を考えてもらいたい。

(b)-4 革新的炉概念の開発研究(主要課題領域 4)

(I) 目的・意義について (4. 3)

革新的炉概念の構築といったテーマは、炉心プラズマ研究部に相応しいが、他のテーマは核融合工学部のテーマであり、ここで考えても上すべりに終わるのではないかと考える。また、経済性向上について具体的な方策を示す必要がある。

(II) 研究展望及び達成目標について (3. 7)

核融合動力炉実現のためには、経済性と環境受容柱の観点からの研究開発が非常に重要である。従来からの発想に補られることなく、この分野の研究を育成、発展させてほしい。その際、外部との連携・協力を重視して欲しい。

本領域での研究目標が遠く実用炉まで展望しているにも拘わらず、具体的テーマ構成が原型炉の概念設計に限定されているように見える。本研究が大きいインパクトをもつためには、実用炉を視点に入れた研究であることが重要である。例えば、核融合炉が実用性をもつためには、軽水炉と対抗できる程度まで炉構成の簡略化の研究が必要である。

(A) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について (4. 0)

包含すべき研究領域が多岐にわたること、原研の研究従事者数はそれほど多くないことから、外部研究者との研究協力を考慮すべきではないか。

D-T 核融合炉として最も可能性が高い概念設計が SSTR であるならば、ITER の設計に対するフィードバックを明確にすることが大切である。

(C) 予想される成果の波及効果について (3. 4)

現在、核融合研究すなわち、ITER ということで、一般から見て核融合研究全体が良く見えていないように考えられる。核融合の(しっかりした技術基盤に基づいた)将来像を提示することは、核融合研究開発に対する支持基盤を確保する上で極めて重要である。

これからの炉システムに対して、新しい考え方が出れば、波及効果が大きい。

(c) 資源(予算、人員等)配分について (3. 9)

トロイダルコイル改修は是非進めるべきである。

JT-60 に人員が集中するのは当然であるが、これからはソフトウェア研究が大切になるので理論・シミュレーションを重要視して欲しい。

(d)原研他部門との協力・連携について (3. 9)

炉心プラズマ研究は、那珂研が中心になるのはしかたがない。そのために、他部門との協力や連携は強くないように見える。

(e)外部機関との協力・連携について (4. 0)

核融合科学研究所での核融合ネットワークとも更に密接に協力して行くことよい。JT-60で特定研究協力の公募をしていることは、大学との協力関係を拓げる意味でよいことである。また、原子分子過程については、関西研光量子科学センターや核融合科学研究所研究・企画情報センターとの研究協力を積極的に行うことがJT-60、JFT-2Mの研究推進に役立つと考えられる。

JFT-2M 理論研究などでかなりの協力関係があるが、ここ数年の大学院生の急増、それに伴わない研究予算の伸び悩みから見て、大学院生の本格的活用を図ることは、原研、大学双方の利益になると考えられる。連携大学院などがあるが、省庁再編を機会により本格的な協力システムを構築すべき時期ではないか。

このような研究は、大学、企業と大いに協力・連携すべきである。

(f)人材養成の施策について (4. 2)

原研が核融合研究開発における最大のポテンシャルを有する研究所であること、また原研においてのみ可能な研究分野を保持していることから、人材育成は単に原研研究者、技術者のレベルアップの視点にとどまらず、広く大学、企業等における核融合を目指す若手研究者・技術者、大学院生の育成に留意して欲しい。

原研の研究者は、30代後半から40代前半にいい仕事をして、室長やグループリーダーになり、いわゆる管理職の道を進むため、スペシャリストとして育てていない面もある。スペシャリストを評価することがこれからは必要ではないか。

2) 総合所見(所感、問題点、提言、等)

炉心プラズマ研究はいまだに研究段階であり、ある方向性を言うのは困難である。一方計画研究ということで方向性を示さなければならない面もある。したがって、いろいろなことを総合的に、真摯に評価して決めていくことが必要である。

JT-60に代表されるように、定常化運転の実証など、核融合プラズマ物理研究で多大な成果を達成したことは、高く評価されるべきである。本研究部の研究計画は今後のITER計画の推移に強く依存するから、マンパワーの許す限り、多くのオプションを検討しておく必要がある。

大目的に向けての研究であることを常に忘れないで欲しい。トリチウムを使用しない研究であることを念頭におき、その限界を認識するとともに、機会ある毎に、トリチウム使用実験(JET等)との協力研究を進めて頂きたい(物理屋がトリチウムに触れる事は極めて大切)。

大いに外部機関と研究協力できる分野であるので、大学やその他、企業等との協同研究をして欲しい。将来の革新的炉についても、外部機関(大学、企業)と協力して、異なる視点からの考え方、指摘やコメントをもらうべきである。

JT-60 は、これまでの研究をレビューして見る必要があるのではないか。数多くの論文が発表されているので、これを基礎に、将来も評価される知見は何なのかをまとめる作業を行って欲しい。これからの核融合研究の財産になると思う。ITER から SSTR へ発展する道は、内部輸送障壁による閉じ込め改善と自発電流の高いプラズマが定常的に得られるかどうかである。これに対し、負磁気シア配位と高ポロイダルベータ配位が候補になっているが、どのような配位が最適であるのか、まだ検討が不十分なように見える。理論と実験の対応について、より深いレベルでの検討が必要な場合が多くなると思われるので、半年～1年間だけ集中的にある問題に取り組むグループを組織するようなことを考えても良いだろう。

項目別評価の評価点をまとめたものを表4に示す。

表4 炉心プラズマ研究部の事前評価対象研究開発課題の評価結果

評 価 項 目	評価点 (5点満点)
(a) 部の基本的考え方について	4.4
(b)-1 JT-60 による炉心プラズマ高性能化技術の開発研究 (主要課題領域 1)	
(i) 目的・意義について	4.4
(ii) 研究展望及び達成目標について	4.2
(iii) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について	4.2
(iv) 予想される成果の波及効果について	4.2
(b)-2 JFT-2M による先進的プラズマ技術の開発研究 (主要課題領域 2)	
(i) 目的・意義について	4.3
(ii) 研究展望及び達成目標について	4.2
(iii) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について	3.9
(iv) 予想される成果の波及効果について	3.8
(b)-3 理論研究による炉心プラズマ物理の体系化 (主要課題領域 3)	
(i) 目的・意義について	4.0
(ii) 研究展望及び達成目標について	3.9
(iii) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について	4.1
(iv) 予想される成果の波及効果について	3.9
(b)-4 革新的炉概念の開発研究 (主要課題領域 4)	
(i) 目的・意義について	4.3
(ii) 研究展望及び達成目標について	3.7
(iii) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について	4.0
(iv) 予想される成果の波及効果について	3.4
(c) 資源(予算、人員等)配分について	3.9
(d) 原研他部門との協力・連携について	3.9
(e) 外部機関との協力・連携について	4.0
(f) 人材養成の施策について	4.2

3. 2. 5 核融合装置試験部

(1) 研究計画の概要

1) 目的

炉心高性能化研究(「プラズマの閉じ込め性能の向上」と「トカマク定常化」)を進めるのに必須の核融合実験装置である JT-60 と JFT-2M の運転・保守及び機器管理を実施して、安全で安定な運転を遂行する。また、炉心高性能化研究を世界的に牽引・先導するため、新たな研究領域を拓く道具となる装置機器の開発整備を行うとともに、実験の柔軟性と研究効率を向上させる技術開発を進める。さらに、両核融合実験装置とも稼働開始以来、15年以上を経過するため、高経年化対策に万全を期し、装置機器の予防保全と健全性・安全性確保に努める。

以上により、炉心高性能化研究の進展や実験炉(ITER)の設計・建設及び原型炉概念の展開とその物理的基盤の構築に貢献する。また、装置機器技術の蓄積及び技術集団と人材の育成を継続的に進めて、運転技術、機器管理技術及び安全技術等に係る核融合技術資産を創出し、実験炉計画等に継承する。

2) 達成目標

(イ)「第三段階核融合研究開発基本計画」に従って進められる炉心プラズマ研究のために、運転管理方式の最適化及び適確な放射線安全管理、並びに綿密な運転計画管理と機器管理の実施により、装置の健全性確保に万全を期し、JT-60 と JFT-2M の安全で安定な運転を遂行する。

(ロ)新たな研究領域を拓く機器の開発整備(電子サイクロトロン電流駆動装置、先進材料プラズマ試験の機器開発等)を行い、炉心プラズマの性能向上や領域拡大を目指す。これまでの成果と経験を発展させて、既存の装置機器の改良や性能向上に係る技術開発(負イオン NBI 装置の性能向上、プラズマ電流分布の実時間可視化開発等)を進め、実験の柔軟性と研究効率の向上を図る。

3) 進め方

業務(運転及び保守管理)と開発研究(開発と性能評価)を有機的に連帯させ、部全体の運営を統括する。これらの業務と開発研究を通して、核融合技術資産(運転技術、機器管理技術、安全技術等)の創出と継承を図る。

4) 主要課題領域

(イ) 装置の運転・保守と機器管理(主要課題領域 1)

炉心プラズマ研究を進展させるためには、JT-60 と JFT-2M を有効に活用することが必須であり、そのため運転管理方式の最適化及び放射線安全技術の適確な運用、並びに綿密な運転計画管理と機器管理の実施により、安全で安定な運転を円滑に進める。特に、両装置とも高経年化が進みつつある状況のもとで、各設備・装置機器の高経年化対策を実施し予防保全に努めて、健全性や安全性の確保に万全を期す。

これらにより、実験炉(ITER)の設計や定常核融合炉の基盤構築に貢献するとともに将来必要となる核融合技術資産(運転技術、機器管理技術、安全技術等)の創出と継承に資す

る。

(D)装置機器の技術開発と開発整備(主要課題領域 2)

核融合研究開発を効果的に推進するには、既存の装置機器を最大限活用して、研究の柔軟性と効率を一段と向上させたり、あるいは、限られたマンパワーのもとで能率良く成果を得る上で鍵となる、既存の装置機器の改良や性能向上等に係る技術開発が不可欠である。そのため、負イオン NBI 装置の性能向上、プラズマ電流分布の実時間可視化開発及び超伝導コイルへの送電技術に係る技術開発を進める。炉心プラズマ研究の領域拡大や高性能化を目指して、110GHz ジャイロトロンによる電子サイクロトロン電流駆動装置、先進材料プラズマ試験の機器開発及び高密度化用燃料補給装置の開発を、炉心プラズマ研究部と協力・連携のもとに進める。

5)所内外との協力・連携

(1)那珂研究所の他部及び東海研究所の保健物理部、バックエンド技術部、及び物質科学研究部とは、密接な協力・連携のもとに、研究開発を進める。これらの協力・連携により、他部門の知見・最新情報、成果、経験・ノウハウ等を有効に活用して、核融合装置試験部の諸活動を能率良く推進する。また、保安管理に関する事項については、原研の全所的な諮問機関である使用施設等運転委員会の審議とチェックを受ける。

(D)我が国全体における核融合研究開発の効果的推進や人材・資源の有効活用、並びに組織が異なる研究者・専門家との相互理解や共通認識の深化のために、外部機関(国立研究機関・大学、産業界等)との協力・連携は、より開かれた形態で推進する必要がある。このため、外部機関との研究協力を、今後、一層強化・促進する。

(H)国際協力については、三大トカマク協力、日米協力及び日欧協力等を活用して、欧州の大型トカマク装置 (JET)や米国の中型トカマク装置(ダブレットⅢ)を中心に、運転技術、装置機器技術、機器開発等に係わる情報交換と人員交流を行う。

これらの協力・連携の成果を有効に採り入れ、研究開発の進展に役立てる。

6)その他

核融合装置試験部は、先端的研究を担う部門とそれを支援する裏方的な役割を果たす部門の中間位置にあるが、核融合という最先端分野では、装置機器の運転自体が研究開発的要素を多く含んでいることに大きな特徴がある。従って、核融合装置試験部における活動の方向性(核融合技術資産の創出・継承)は、今後の核融合炉開発にとって、極めて重要な位置を占めている。また、これまで培ってきた技術集団と人材は、貴重な人的財産であり、その能力と経験・ノウハウを今後の大型プロジェクトに役立てていきたい。

(2)評価結果

1) 項目別評価 (()内の数字は評価点数で、5 点が満点)

(a)部の基本的考え方について (4. 2)

研究と管理業務、研究計画の遂行と成果の抽出など大変うまく行っていると評価される。ただ知見、経験の集約の仕方、体系化の実現が望まれるが、これが出来ると ITER にも有効に反映できるので、難しい課題であるが、努力することが重要である。

運転員の技術継承は大切なことと考える。JT-60 を改造して実験を継続するにしても、ITER を建設するにしても、ここでの経験が継承されなくてはならない。是非とも若手を育成して欲しい。

運転保守は、必要な監視項目を計算機へ入れることにより普段の必要な人数を減らして省力化し、より多くの人的資源を装置技術開発へ向けていく努力をすることが必要である。

(b)-1 装置の運転・保守と機器管理（主要課題領域 1）

(イ) 目的・意義について (4. 0)

JT-60 電源制御系の保守運転こそ集中監視(管理)がもっとも効果的な処であろう。全般的にもっとも大事な処(効果的な処、実験の能率をあげるために、例えば計測装置の運転)に人を出すべきであろう。

重要課題を目的としていて適切である。装置のトラブルに対する診断、対応について体系化して、核融合・保全工学を築くことを望む。

JT-60 のこれまでの運転実績は高く評価される。

(ロ) 研究展望及び達成目標について (4. 1)

トラブル例などを十分に分析して、製作・運転とトラブルの関係をよく整理しておくことは重要であり、例が多ければその体系化を図ることが可能であろう。

(ハ) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について (4. 1)

高齢化対策は、組織的に良く考えられて行われている。

JT-60 運転の実績を、各々の人々が利用できるようにする。

運転計画に合わせて、機器管理とオーバーホールが適切に行われている。

(ニ) 予想される成果の波及効果について (4. 3)

JT-60 の運転経験は、ITER の運転にも生かされると思われる。一方、ITER では、トリチウム環境や壁材の放射化にも対応する必要があるので、ITER を想定して、JT-60 でシミュレーションして見ることも考えられる。

新しい原型炉に大きな波及効果を示す。

(b)-2 機器装置の技術開発と開発整備（主要課題領域 2）

(イ) 目的・意義について (4. 2)

数多くのテーマは、実験にとって非常に大事なものであり、ヒューマン・リソースを投入して頑張るべきである。

(ロ) 研究展望及び達成目標について (4. 4)

よく計画されている。D-D 反応によるトリチウム挙動についても、研究を進めて欲しい。

110GHz ジャイロトロン の 2MW 目標はもう少し重要性を考えて投資額を増やすべきではないか。

(ハ) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について (4. 2)

NNBI とジャイロトロン の開発は進んでいて、ITER に適用可能なレベルに近づいているのは評価できる。JT-60 のこれからの問題としてトロイダルコイルの冷却系があるが、対応が考えられている。

(二) 予想される成果の波及効果について (4. 2)

波及効果として記述してあるものに加えて、他分野(材料、プラズマ応用等)に波及するものが多い。より幅広く波及を考えて欲しい。

JT-60 の次期装置としての ITER で生かせるノウハウがマニュアルとしてまとめられる可能性がある。ヒューマンファクターも考慮して、トラブルに対応しようとしているのは興味深い。

(c) 資源(予算、人員等)配分について (3. 8)

合理化と言う視点が資料に書かれてないのは少し寂しい。業務の量と必要人数との間の関係について経験に基づいて明確にできないか。

JT-60 は高経年化という問題をかかえているが、運転保守は計算機を多用しての省力化が可能はずであり、よりアグレッシブに、“新たな研究領域を拓く装置機器の開発整備”と実験結果からみた能率を高めるための計測高度化・安定化に資源配分を行うべきである。また、装置に係わる R&D(コンディショニング、電磁力、T インベントリー低減等)についても推進して頂きたいので、R&D のマンパワーを増やす必要がある。

(d) 原研他部門との協力・連携について (3. 6)

ITER の設計、建設、保守等に反映されることを望む。

協力・連携をもっと進めることが重要である。JT-60 の運転ノウハウを他に知らせることが必要である。

(e) 外部機関との協力・連携について (3. 9)

大学との協力に関して、①原研テーマに参加、②共同でテーマを作成、③大学主導型の研究、に分けられるが、三番目についても実施するようになれば、本当の協力が実現できたことになり大変好ましい。

産業界のアクティビティー保持にも協力して頂きたい。

LHD とは共通項も多く、NNBI とジャイロトロンについても協力は可能であり、交流を重視する方針を実行に移して欲しい。

(f) 人材養成の施策について (4. 0)

JT-60 の装置運転グループには、最初から従事しているグループがいて、細部まで精通している人がいると想像される。そのような人材をどのように養成するか、知識をどのように継承するかは容易な問題ではない。継承にこだわると、新しいテクノロジーの導入が遅れることもあるが、是非とも若手の運転員の養成をお願いする。

(g) 上記以外の評価項目について

計測・制御関係も重要である。

2) 総合所見(所感、問題点、提言、等)

核融合技術資産の体系化を今後図っていくことを期待する。15 年の運転・管理の経験が豊富にあると思われるので、是非手掛けて頂きたい。高経年化に備えて、故障物理をよく分析・研究してひとつの学術体系を構築する位のことがあって良い。JT-60 の運転管理の経験の集積が ITER に反映されることを望む。

装置試験部のこれまでの成果は世界的に見てもトップレベルであり、炉心プラズマの高性能化に多大な貢献をしてきた。安全に係わる事象についても、委員会等ですぐに公表し、対応についても確実に遂行してきた。これからもこのように計画を実行して頂きたい。

項目別評価の評価点をまとめたものを表5に示す。

表5 核融合装置試験部の事前評価対象研究開発課題の評価結果

評 価 項 目	評価点 (5点満点)
(a) 部の基本的考え方について	4.2
(b)-1 装置の運転・保守と機器管理 (主要課題領域1)	
(i) 目的・意義について	4.0
(ii) 研究展望及び達成目標について	4.1
(iii) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について	4.1
(iv) 予想される成果の波及効果について	4.3
(b)-2 機器装置の技術開発と開発整備 (主要課題領域2)	
(i) 目的・意義について	4.2
(ii) 研究展望及び達成目標について	4.4
(iii) 進め方(含むテーマ構成と各テーマの位置付け)について	4.2
(iv) 予想される成果の波及効果について	4.2
(c) 資源(予算、人員等)配分について	3.8
(d) 原研他部門との協力・連携について	3.6
(e) 外部機関との協力・連携について	3.9
(f) 人材養成の施策について	4.0

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バル	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクターも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

圧力	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)
= 4.184 J (熱化学)
= 4.1855 J (15 °C)
= 4.1868 J (国際蒸気表)
仕事率 1 PS (仏馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

核融合研究開発専門部会評価結果報告書