

高エネルギー加速器研究機構
KENS 中性子散乱施設
国際評価委員会

KENS 国際評価委員会による評価報告と勧告

2004年 6月

KENS 外部評価委員

鈴木 謙爾 (委員長)
東北大学 金属材料研究所 名誉教授
(財)特殊無機材料研究所理事長

John M. Carpenter (副委員長)
Argonne 国立研究所
IPNS 技術部長
米国

Colin J. Carlile
Laue-Langevin 研究所
所長
フランス

Andrew D. Taylor
Rutherford-Appleton 研究所
ISIS 施設長
英国

安岡 弘志
日本原子力研究所
先端科学研究センター長

橋本 竹治
京都大学教授

吉沢 英樹
東京大学 物性研究所教授
中性子科学研究施設長

秘書

池田 進
高エネルギー加速器研究機構
物質構造科学研究所教授
中性子科学研究施設

本文

委員会報告概要

緒言

KENS の概観

KENS 運転状況

人員

予算

大学間共同利用研究

教育活動

国際協力

KENS の研究活動

パルス中性子源の更新

装置の開発と更新

研究活動

結晶構造

液体と非晶質体

高分子と生体物質

スピン系のダイナミクス

J-PARC 計画による JSNS 施設

J-PARC の建設

JSNS における装置とサイエンス

J-PARK への展望

J-PARC 計画における KENS の役割

装置建設のための予算措置

人員配置と共同研究

結論および勧告

委員会報告概要

KENS の歴史は、驚くべき科学成果そして革新と創成の歴史である。KENS は、革新的な改善による中性子源性能向上、創意を凝らした中性子散乱装置群の増設と開発を通じて、科学・技術に先進的な寄与を与えつつけている。加えて、KENS 所員は、J-PARC の進展に必要不可欠な多くの R&D 研究を着手してきた。それらのプログラムが達成されるだけでも賞賛に値することであるが、KEK の限られた予算と人員のもとで、それらが達成されたことは、奇跡以外の何ものでもない。さらに、J-PARC の R&D 研究プランや中性子実験装置群の全体像に関する初期構想は、KENS のこれまでの成功と発展の伝統を十分に反映したものである。

核破砕パルス中性子源施設 KENS は、凝縮系科学と中性子物理のための共同利用研究施設として 1980 年に稼動した。第 1 回 KENS 外部評価委員会は 1997 年に開催され、KENS 施設が、パルス中性子を用いた高度な科学研究や技術の開発において十分に国際的貢献しており、それは最高水準に達しているとの結論を得た。

1997 年以後、KENS では多くの変革が行われた。2000 年には、タングステンターゲットの導入により線源強度は 20% 増加し、また、いくつかの装置が新たに建設され、あるいは改良された。KENS にとっての最大の出来事は、2000 年、J-PARC (Japan-Proton Accelerator Research Complex) 計画における 3GeV 陽子加速器を用いた MW 級核破砕パルス中性子源 JSNS (Japan Spallation Neutron Source) が建設開始されたことである。したがって、1998 - 2004 年の KENS 施設の活動と、2007 年に稼動を開始する JSNS における活動の将来像を検討することは、現在、絶好の時期と言える。

第 2 回 KENS 外部評価委員会は、2004 年 6 月 18、19 の両日、戸塚洋二 KEK 機構長の要請によって開催された。評価委員会は、1998 年から現在にいたるまでの KENS 施設で得られた科学的・技術的成果、JSNS 計画の現況並びに KENS の高い活力を JSNS に確実に移行して行くシナリオについて評価した。

評価委員会の結論と勧告は以下の通りである。

KENS の科学的成果

1997 年以來の KENS の研究成果は、世界の物質科学、中性子物理の進歩に多大の貢献をし、さらに、それは非常に高い国際水準にある。KENS がカバーする研究分野は、a) 結晶学、b) 液体と非晶質体、c) 高分子と生体物質、c) 磁性体におけるスピンドYNAMIX にわたっている。主なハイライトは以下の通りである。誘電体メモリ (FeRAM) 材料の構造評価、水溶液のメソ構造、空気 / 水界面における両親媒性ブロック共重合体単原子層のナノ構造、低次元量子スピン系における連続スピン励起の観測。なお、日英中性子散乱協力事業が KENS の研究分野を広げ、その科学水準を高めるのに非常に重要な役割を果たしていることを付記しておく。

J-PARC 計画の JSNS 施設にかかわる活動

JSNS 施設当初に完成が期待される画期的な中性子実験装置 4 台が、KENS によって建設されようとしている。(a) 高分解能チョッパー分光器、(b) 高分解能粉末回折計、(c) 全散乱装置、(d) 水平型反射率計である。これらの分光器を用いた実験計画は、空間およびエネルギー領域における非常に高い分解能の観測を目指している。いくつかのハイライトは以下の通りである。液体 / 液体界面、非常に高い反射率測定 ($\sim 10^{-10}$)、mg オーダーの試料の測定、複合材料のナノ構造、強相関電子系における広いエネルギー・運動量空間での高分解能分光。

また、JSNS 施設のターゲット、減速材、 ^7Be の輸送、高エネルギー陽子による中性子の発生効率等に関する工学的諸問題、 T_0 チョッパー、偏極フィルター、検出器、データ集積系などの開発と建設に、KENS 所員が不可欠の役割をはたしていることは強調されなければならない。特に、JSNS に設置される分光器の建設は、KENS 所員の長い経験の蓄積が無くしてはなし得ないものである。

しかしながら、本評価委員会は、KENS が担当する装置建設の予算が KEK の中でさえも認められていないことを知り、驚きを隠し得ない。ここで次のことを強く勧告する。KEK が担当する 4 台中性子実験装置については、KENS 施設のシャットダウン期間の関連予算を計上して 2007 年までに建設すること、また、職員の人数を新たに 30 人以上増加すべきことである。

KENS-JSNS 移行シナリオ

KENS 所員と KENS 利用者は、2005 年の KENS 施設終了時から 2007 年の JSNS の稼働時まで、いかにして研究活動を維持、発展させるかという深刻な問題に直面している。本評価委員会は、中性子研究のパートナーである ISIS、IPNS、JRR-3、ILL が、この期間における KENS 所員と KENS 利用者の研究活動を支援するような特別なアレンジを提案する。これは、2007 年に JSNS が稼働を開始したとき必要な若い人材の確保に有効な手段でもある。KEK は、これに関わる協力活動に財政的な支援をおこなうべきである。

KEK は、機構内に中性子、放射光、ミュオンという 3 つの粒子線源を確保し、さらに、つくば市にあって、近距離に極めて多くの研究機関が立地しているという好条件を有している。この立地条件を利用して、KEK は、世界に類のない物質構造科学フォーラムを組織すべきである。

緒言

KEK 機構長主催の 2004 年 KENS 外部評価は、6 月 18 (金)、19 (土) の両日 4 号館セミナーホールで開催された。委員は、C. J. Carlile 氏、J. M. Carpenter 氏、橋本竹治氏、鈴木謙爾氏、A. D. Taylor 氏、安岡弘志氏、吉沢英樹氏である。初日に、物質構造科学研究所長小間篤教授による歓迎の挨拶、委員長と副委員長に鈴木謙爾氏と J. Carpenter 氏をそれぞれ選出、進行に関する合意の後、終日発表と討論を行った。第 2 日目に、委員会は KENS 施設を見学し、その後討論を行い本報告書を作成した。Taylor 博士は委員会に出席できなかったため、前もってコメントを委員会宛に提出していた。

本委員会の第 1 の任務は、1997 年の前回の外部評価から現在までの KENS の活動状況を評価することである。2 番目の任務は、国家プロジェクト J-PARC (Japan-Proton Accelerator Research Complex) 計画の主研究施設の一つである MW 級核破砕パルス中性子源施設 JSNS (Japan Spallation Neutron Source) の建設状況をレビューすることである。3 番目の任務は、KENS のシャットダウンから JSNS の稼働開始までの約 3 年間、いかにして KENS 施設の研究活動を維持・推進させるかを勧告することである。本会合において、KENS とその共同利用者に影響する包括的な変化が討議された。

KEK は日本原子力研究所と共同で、MW 級の核破砕パルス中性子源施設 JSNS の建設を 2007 年末までに完了する。したがって、KEK は 2005 年の KENS のシャットダウンと KENS から JSNS への研究活動の移行のシナリオを提案した。J-PARC 計画とそれにむけての展望の評価も本委員会の任務である。

KENS の研究活動を評価する第 1 回外部評価委員会は 1997 年に開催された。委員会は、KENS の世界における物質科学、中性子物理の発展への多大の寄与を結論し、KENS 所員の増員と JHF (Japan Hadron Facility) 計画の実現を勧告した。第 2 回評価委員会はこの勧告の遂行状況を確認するものである。

委員は、各委員に課せられた問題にたいする報告書を委員長に提出した。本報告書は、各委員の報告をまとめ、委員長の責任において編集された評価委員会のまとめと勧告である。評価結果は KEK 機構長戸塚洋二教授に報告される。

KENS の概観

(1) KENS 運転状況

1978年に立案され、1980年に稼動したKENS施設は、高エネルギー物理学研究所(KEK)ブースター利用施設(BSF)の大学共同利用施設として運営されてきた。KENSは、米国アルゴンヌ研究所のプロトタイプ ZING-P、ZING-P'につづく中性子散乱用の最初の核破砕パルス中性子源である。KENS中性子源の実現、絶えざる改良、陽子ビーム強度の増加が相俟って高い性能が発揮されている。最近の発展の主なものは、10 μ A、20Hzの500MeV陽子ビーム出力向上、ターゲット-減速材系の改良を経た現在の高効率Ta被覆Wターゲット設置、デカップラーとポイズン減速材の最適化、Be反射体の(性能/価格)最適化である。これらの際立った性能向上は、一つには、永年にわたる北海道大学実験施設および米国ロスアラモス研究所ニュートロニクス計算グループとの共同研究の結果もたらされたものである。KENS開始から現在まで一貫してとられてきたテーマは、一次中性子源(ターゲット)と減速材の緊密な結合で、このため陽子あたりの遅い中性子の比は他の施設の2倍以上のものを与えている。KENSはほぼ完全な信頼性で年間約2400時間陽子ビームを受けており、並立するミュオン研究施設も年間約2400時間の陽子ビームを受けている。

KENS施設は常に中性子ビーム強度の増加を行い、それを実現する貴重なパラメーターを世界に発信してきた。これはJ-PARCの成功に直結する研究成果である。KENS線源の各部の性能と優れたメンテナンスにより、信頼性は満足のいくものとなっている。線源は、比較的low出力であるが、KENSチームは「輝度と結合度」、つまり、中性子発生源とモデレーターの結合度を強くすればより多くの有効中性子を得ることができることに着目し、可能な限りサイズを小さくしている。このことにより、入射陽子ビームと減速された中性子ビームの距離が最小におさえられ、損失もまた最小におさえられている。それ故、入射する高エネルギー陽子と熱中性子出力の比は、他のどの施設よりも高くなっており、高水準の科学研究を可能にしている。このアイデアは、当然、J-PARCのターゲット-減速材集合体の設計(それはより困難であるが)に受け継がれている。

1997年に改築された第2実験室には、6台の新しい装置が設置され、また、旧実験室のいくつかの装置は改良、更新されている。KENSの実験室で印象的なことは、実験装置が非常に密集していることである。パルス源の実験装置は、原子炉の実験装置と原理的に大変異なっており、既に原子炉で達成されていた技術水準に達するまでには、新しい独創力が発揮されることが要求されてきた。それは、単に、創設されてからの時間経過の長さや世界のパルス源の数の少なさによるものであったが、追いつくためには創意と工夫が必要であった。この創意と工夫のプロセスを、まさに、KENSに見ることができる。装置の量と質、その多様性は見学者の目をみはらせる。この中で、小角散乱装置、高分解能の分光器や回折装置は、パルス中性子実験装置の世界標準規範となっており、それらはJ-PARCにそのまま導入できるものである。1997年以来、装置の数は変わらないが、装置群の改良、発展を導いた運営方法は評価に値する。同様にうまく行われているものとして、多くの萌芽的、野心的、補助的なデバイス開発があげられる。特に、偏極フィルターが使用に供されていること驚愕に値する。

あまり強調されていないが、これらの成功を導いたのは、少人数の能力の高い若い研究者達である。研究者は若いが殆どのことを一人で行っていることを述べておきたい。ここには、専門的な仕事を技術集団のみに任せていない。この文化は、J-PARCにおける運営の中で、さらなる大きな利益を生み出す財産となるであろう。

(2) 人員

KENSの研究活動は、KENS所員と他大学の共同研究者、企業の研究者によって支えられている。KENS所員の総数は、教授、助教授、助手、技師を含めて、1998年以降ほぼ一定であり(15-17人)、所員の増員と(外部および内部からの)予算獲得の努力がなされてきた。この結

果、主として外部資金を使ってポストドクと非常勤研究補助員の増員が可能となり、その総数は2003年度には12人に達した。また、KENS 共同研究者（B1 グループの研究者と学生を含む）の全数は2003年度には80人に達している。実際には、KENS の研究活動は、これら研究者総数約110人によって支えられているのである。しかしながら、KENS は主要な2つの使命をもっている。それらはKENS の運営とJ-PARC の建設である。KENS とJ-PARC における活動を考慮すると、現在のKENS 所員数は圧倒的に少ない。

（3）予算

中性子源更新のための特別予算は2000年に承認されている。しかしながら、1997年以来、KENS を運営し、中性子源を補修し、分光器を改良するためにKENS に配分される年間予算は約2億5千万円と一定である。このように、KENS 本来の予算はほぼ一定であるのに対し、1997年以来、KENS 所員は右肩上がりに多くの科学研究費を外部から獲得してきている。例えば、1998-2003年度の期間、KENS は日英協力のための科学研究補助金を獲得した。さらに、KENS 所員は、KENS との国際協力研究（日英協力を含む）を遂行するため、並びにJ-PARC 計画に向けて新しい中性子科学を発展させるための科学研究補助金を、2004 - 2008年度の期間、獲得できる予定である。

（4）大学共同利用研究

KENS 所員と外部研究者は、各実験装置について共同研究グループ（B1 グループ）を形成している。このシステムはKENS 施設に特有の方式である。B1 グループは分光器の開発 / 補修 / 改良の義務を負うと同時に、一般ユーザーのサポート役ともなる。このような義務の代償として、B1 グループは全実験時間の50%のマシントimeとB1 研究の予算の援助をKENS から受けている。KENS における多くの研究成果はB1 グループによって生みだされている。

大学共同利用プログラムは、研究者から研究課題を受けつける。課題は3人のレフェリーによって査読され、中性子課題採択委員会（PAC）で審査される。2002年から、課題は年2回受けつけている。この改革はうまく作動している。課題出願機会を年2回にしたことにより、2003年以降の課題数増加がもたらされている。

最近のKENS における大学共同利用研究の傾向には3つの特徴が見られる。1つは、課題出願の増加である。この結果、不採択の課題が増加した。2つ目の特徴は、研究領域の特定分野への集中である。主要な分野は物質科学である。3番目は、これらの分野の発展を促すために、新しい実験装置SIRIUS、SWAN、ARISA、PORE、EXCED が建設され、さらに、既存の実験装置SWAN、VEGA、INC、LAM-D、LAM-40、RAC が改良されたことである。

2002年に、KENS には約700人のユーザー登録があった。この数は、研究課題の人員を重複を許して足し合わせたものである。KENS のほとんどのユーザーは、国内の大学、研究所からの研究者、学生である。海外からの利用者はまだ少数であるが、2003年度には海外から8件の課題が受理されている。

（5）教育活動

KEK はMEXT のもとで、総合研究大学院（総研大）の一部を担当している。総研大は博士課程の大学院である。KENS 所員の一部は総研大の教官で、通常の大学と同様に講義を受け持つ。1997 - 2003年の期間に、7人の学生がKENS 所員の指導を受け、5人が博士号を取得した。また、国立・私立・公立大学に所属する博士課程の大学院生に対して中性子実験教育を行い、数十人の博士を誕生させることに貢献している。その他に、KENS 所員はしばしば外部の大学での講義に招待される。また、KENS 所員はしばしば研究者あるいは大学生以外の一般人に啓蒙的な講義をするよう要請される。最近では、民間企業の研究者が中性子を利用することに興味を示しはじめており、KENS 所員が講義に出向くこともしばしばである。KENS は、中性子利用のトレーニングスクールを主催するのに適した施設であり、このような活動に対する経済的支援が強く望まれる。

る。

(6) 国際協力

中性子散乱に関する日英協力事業(第2期)は1997年に始まり、革新的なチョッパー分光器 MAPS を ISIS に建設した。また、KEK が日本の大学および研究所から公募し選考した課題のうち約20件/年の研究課題が ISIS で採択されており、110日/年のマシンタイムで実施されている。KENS-IPNS および KENS-LANSCE の共同研究が、それぞれ2000年、1998年に締結されている。さらに、KENS はアジアの国々との協力をを行っている。KENS-BATAN (インドネシア) 協力研究は2003年に始められた。日韓中性子科学協力研究は2003年に KENS により提案され、両国で数回のワークショップが開催された。J-PARC における新しい分光器に関する台湾との協力研究が現在計画中である。

KENS-ISIS の協力は実り多いもので、強力な非弾性散乱分光器群を ISIS に建設する結果を生み出すと同時に、そこで培われた技術は KENS の実験装置にもフィードバックされている。ISIS で建設された実験装置は、世界中の中性子散乱実験装置を代表するものとなっている。また一方、KENS にもたらされた技術はまちがいに J-PARC に建設される新しい装置に生かされるであろう。これは、KENS のリーダーの先見性の賜物である。この協力における一つの重要な資産は、科学的のみならず技術的発展に関わる事項について討論が行われる2年に1度の日英研究集会であることを特記しておく。

この30年の間に、パルス中性子源の技術において有益な国際協力がなされてきた。これは、1970年代初頭に KENS の研究者が指導的な役割をはたして立ち上げられた ICANS 会議に代表される。特に、大学からは石川教授、KENS からは渡辺教授が建設的な役割をはたした。この協力は非常に有効であり、国際的な協力はこのように行われるべきであることが示された。それら先見の明とリーダーシップを今なお現存させていることに対して、KENS 所員は賞賛されるべきである。

総括すると、KENS と海外のチームの最良の共同研究が実現されているといえる。例えば、一方が最良の試料を用意し、他方が最良の評価方法を用意している。J-PARC が開始したとき、このようなプログラムを軌道にのせるための集中的な努力が必要であろう。また、このような国際協力は相互の利益を認識しながら、強力に推進されなければならないことは疑う余地がない。

KENS の研究活動

(1) パルス中性子源の改良

2000 年に、KENS はターゲット 減速材 反射体集合体 (TMRA) を HIP 法で製造された新しい Ta 被覆 W ターゲットに変更した。より鋭いパルスを与える Gd ポイズンが室温減速材に取り付けられた。新しいターゲットは、以前の Ta ターゲットに比べて約 20 % の線源強度の増加をもたらした。初期状態から 70 % の強度減少を示していた以前の TMRA の冷中性子強度は、もとの回復した。中性子源の性能を分光器で測定した結果、冷中性子強度は完全に回復し、熱外中性子束はニュートロニクス計算の予測どおりに増加したことが確認された。散乱中性子のプロファイルは低いバックグラウンドを示し、テイルが短くなったためより対称的となった。全散乱分光器では、動径分布関数がより良い分解能を示しており、全体として、新しい TMRA は物質研究に非常に良い可能性を与えるものと言える。

(2) 装置の開発と改良

新しい高分解能粉末回折計 SIRIUS が 1998 年に、新しい反射率計 ARISA が KENS と日本の高分子グループの協力により 2000 年に、そして eV-回折計 EXCED が 2000 年に建設された。さらに、単結晶回折計 FOX が、1997 年、検出器系を改良された。高強度粉末回折計 VEGA と小 / 中角散乱分光器 SWAN が 2002 年に科学研究補助金で改良された。チョッパー型分光器 INC は、2003 年に検出器の一部を PSD に変える改良がなされた。

(3) 研究活動

(3-a) 結晶構造

多くの研究が、単結晶回折計 (FOX)、熱外中性子回折装置並びに 2 台の粉末回折計 (多目的粉末回折計 VEGA と最新式高分解能装置 SIRIUS) を用いて行われた。構造解析の研究において、実用材料の機能と構造の関係を明らかにする努力が進められた。

(3-a-i) 単結晶解析 (FOX, EXCED)

Pt に富む Pt-Mn fcc 結晶における 2 段階の規則化がはじめて観測された。温度上昇とともに、ABC₆ 型 - Cu₃Au 型 - 不規則 fcc 構造の逐次相転移が明らかにされた。さらに、多くの研究が FOX を用いて行われた。例えば、規則 Pt-12.5 at.% Mn 合金の SDW の形成、TbRu₂Ge₂ 三元合金における二次元磁気超格子、TbRu₂Si₂ の外部磁場下での多段階メタ磁性相転移、 β -Sn の特異な散漫散乱。

熱外中性子を利用した新しい中性子単結晶構造解析装置 EXCED によって、中性子吸収物質 Gd 合金の構造解析実験が行われた。これによって、GdB₆ 合金で (1/2 1/4 1/4) 反射が観測された。これは、角運動量を持たない Gd 原子では観測されないと信じられてきたもので、この分野の研究に一石を投じている。

(3-a-ii) 粉末構造解析 (VEGA, SIRIUS)

2 台の粉末装置の性能向上がこれまでに行われ、その性能は世界第一級の水準に達している。これらの分光器を使った研究論文は、1997 - 2004 の期間で 99 編である (装置グループ (B1): 62、一般ユーザー: 31、企業グループ: 6)。これらの装置で行われた研究は、「新規材料の構造と科学」という分野に属しており、主なトピックスは、強誘電体メモリ (FeRAM) 材料、最初のパイロクロア超伝導体 Cd₂Re₂O₇ の構造相転移と軌道秩序の起源などである。

解析手法の開発は、粉末解析においてきわめて重要である。TOF/MEM 法の開発と Li イオン導電体への見事な応用は、KENS で行われた粉末回折のハイライトの一つである。水素圧下での水素吸蔵合金のその場測定は、KENS における新しい実験技術の萌芽となるものである。電池の性能向上につながるリチウムマンガスピネル電極材料の構造評価あるいは酸化物固体電

解質の研究は新しいエネルギー材料の開発につながるものと期待される。

(3-b) 液体と非晶質体

液体と非晶質固体のナノスケール構造の研究は、KENS と ISIS 施設で活発に行われた研究分野の一つである。1998 – 2003 年の間に、この分野の主題は金属系から水溶液、含水素物質を含む非金属系に移行しており、KENS の HIT、SWAN、LAM-40、LAM-D、LAM-80ET、INC、ISIS の MARI を用いたすぐれた研究成果は 85 編の原著論文で報告されている。

これらの研究は以下のようにまとめられる。

- ・エネルギー材料の静的構造：水素吸蔵物質中の水素原子の観測
- ・新規の冷凍機を用いた分子性ガラスのその場測定
- ・水溶液のメソ構造
- ・ガラス中の集団運動
- ・将来の中性子減速材に用いられるメタン水和物の動的構造
- ・微小空孔をもつシリコン表面の水素の動的挙動
- ・二次元固体の構造

上に述べた問題のうち、二つのハイライトを紹介する。一つは、1-プロパノール水溶液のメソ構造相分離で、これは質量フラクタル模型でよく説明できることが明らかにされた。いま一つは SiO₂ ガラスのボソンピークのくわしい動的構造で、ここでは六員環のバックリング運動がはじめて観測された。

液体と非晶質固体のナノスケールの構造は、J-PARC の主要な研究分野と期待される。J-PARC においてもこれらの研究活動が維持されるように、この分野の装置の立ち上げと支援体制が必要である。

(3-c) 高分子と生体物質

高分子と生体物質の分野で高い水準の研究成果が中性子反射率計 (ARISA)、小角中性子散乱分光器 (SWAN、WINK)、中性子非弾性分光器 (LAM-40) により得られた。

ARISA は最近 (2000 年) 建設され、2002 年から共同利用に供せられたばかりである。それにもかかわらず、ARISA は高い水準の成果を生み出しており、この分野の表面科学と技術に重要な貢献をしている。SWAN と WINK は高分子と生体物質の静的構造を明らかにするのに重要な貢献をしている。ケラチンたんぱく質についての成果は特筆すべきものである。これらの結果は、SWAN、WINK が 0.1 nm から 100 nm という広い長さスケールの階層構造を明らかにできることを示している。階層構造とその協力運動の解明は生命科学に重要なインパクトを与えるであろう。LAM-40 はガラスを生成する高分子の動的挙動について顕著な成果を生み出している。

結論として、この分野で達成された高い水準の研究成果は、多くの外部ユーザーをひきつけてさまざまな研究に拡張されるべきである。

(3-d) スピン系のダイナミクス

固体、液体、とくに磁性体のダイナミクスは KENS の最も強力な研究分野の一つである。本評価では以下の研究成果についてヒアリングを行った。1) INC、MARI、PRISM 分光器を用いた一次元 (1D) 反強磁性体の研究、2) MAPS を用いた高温超伝導体の研究、3) LAM-40 を用いた磁気準結晶の研究、4) IRIS、LAM-80ET、PRISMA、OSIRIS、PONTA-NSE を用いたパーコレーション系の研究。ここで、MARI、PRISM、MAPS、IRIS は ISIS に設置されている分光器である。以下に研究成果と評価をまとめる。

(3-d-i) 1D 反強磁性体

異なったスピン量子数をもつ 1D ハイゼンベルグ反強磁性体 (HAF) 系、CsNiCl₃ (S = 1)、CsVCl₃ (S = 3/2)、CsCrCl₃ (S = 2) の中性子非弾性散乱実験を行い、低温における磁気励起の分散

関係と逆相関長の温度依存性を広範囲に測定した。実験と理論的予測のよい一致はスピんに依存する量子再規格機構の正当性をしめしている。委員会は、高水準にある 1D HAF のスピンの依存量子効果の系統的な研究成果を高く評価する。

(3-d-ii) 高温超伝導体

Cu 酸化物高温超伝導体 (HTSC) のうち、 $(\text{La,Sr})_2\text{CuO}_4$ (LSCO) と $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ (YBCO) では、あるキャリアー濃度で動的および静的非整合性が報告されている。パルス中性子飛行時間 (TOF) 法は、そのような広範囲の高エネルギー励起の測定に適している。最適ドープ量の超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.9}$ ($T_c = 92.5$ K) のスピン相関が MAPS 分光器を用いて広いエネルギー、波長領域で測定された。非整合性と強度がいわゆるストライプ模型で説明できないという結論は非常に重要で、高温超伝導の機構に新たな議論を呼びおこしている。

(3-d-iii) 磁気準結晶

準結晶は、非常に規則的な、しかし周期的ではない (擬周期的) 原子構造で特徴づけられる明確な空間周期性をもっており、周期構造とも無秩序構造とも異なるものである。準周期的に配列したスピンのダイナミクスを理解するために、5 回対称の準結晶 Zn-Mg-RE (RE: 希土類元素) の非弾性散乱実験を LAM-40 を用いて行った。その結果、5 回対称準結晶 Zn-Mg-Tb の局在した集団スピン揺動の存在が 2.5 meV のブロードな非弾性散乱ピークとして観測された。この仕事は、準結晶の動的挙動を理解するうえで重要な寄与をなし、高く評価される。

(3-d-iv) パーコレーション系

パーコレーションネットワークにおける原子配列はフラクタル構造をとる。希釈反強磁性体は最も単純で理想的なパーコレーションネットワークをもつ系である。磁性原子を非磁性原子でランダムに置換していくと、ネール点 (T_N) が減少し、パーコレーション濃度で $T_N = 0$ になる。このとき、磁性原子によるパーコレーションネットワークが結晶全体におよび、フラクタル構造をとる。パーコレーションネットワークの磁気的性質が、二次元イジング系 $\text{Rb}_2\text{Co}_c\text{Mg}_{1-c}\text{F}_4$ 、二次元および三次元ハイゼンベルグ系 $\text{Rb}_2\text{Mn}_c\text{Mg}_{1-c}\text{F}_4$ 、 $\text{RbMn}_c\text{Mg}_{1-c}\text{F}_3$ の単結晶試料を用いて調べられてきた。IRIS および LAM-80ET でなされた臨界散乱の実験によって、パーコレーション領域を正方格子上のフラクタル構造と明確に関係づけたことは、銘記すべき結果である。詳細な研究は継続して行われているが、この仕事はきわめて独創的であり、パルス中性子によるスピンドイナミクス研究における KENS のハイライトのひとつである。

J-PARC 計画による JSNS 施設

(1) J-PARC の建設

KENS 所員は JSNS 施設建設の意義、建設に関わる行程、減速材や中性子散乱分光器の設計および装置開発から測定手段の開発、ソフトウェアの開発に至るまでの JSNS 計画全てにおいて、中心的な役割を担ってきており、現在もその活動が進めている。JSNS は 2001 年度にその建設が開始され、2007 年度に完成を目指す。JSNS における陽子パルス特性は、1MW のビーム出力、25Hz のパルス周期、1 μ s のパルス幅である。この JSNS 短パルス核破砕中性子源は、KENS で培われた技術に基づくものである。

JSNS は 25Hz という加速器繰り返し周期により非常に特徴的な性能をもつ。中性子強度は世界に現存するパルス中性子施設 (ISIS (英国) IPNS (アメリカ) KENS (日本)) を凌駕し、遅い周期は飛行時間法における広い時間幅を与えている。これらは中性子実験において重要な利点となる。また、設置予定の減速材 (液体水素を減速材とし非常に独創的である) は、広いエネルギー幅を必要とする分光器 (測定) に対して有効な強い中性子強度を与えることができる。JSNS には実際の工学的な要請ならびに施設利用者の要求から 23 のビーム孔が設置される予定である。これらのうち 11 のビーム孔は大強度カップルド減速材、6 つは中分解能デカップルド減速材、残りの 6 つは高分解能ポイズン・デカップルド減速材という仕様になっている。

KENS 中性子散乱施設は 1980 年にパルス中性子としては世界最初の共同利用施設としてその産声をあげた。それ以来、KENS の研究者達によって以下の項目に掲げる中性子光学、装置開発など J-PARC 計画に必須の技術開発が続けられてきた。その中でも特に重要である項目を以下に挙げる。

- ・ターゲットおよび減速材の開発
- ・中性子分光器や装置、目的とする科学 (研究) に適合する減速材の性能向上
- ・バックグラウンドチョッパー、ヘリウム偏極フィルター、核偏極技術、検出器、データ集積、解析プログラムなどの開発
- ・大学共同利用の推進

これらの経験に基づいて、KENS 所員は JSNS 計画の中においても、そのリーダーとしての重要な役割を負っている。

(2) JSNS における装置とサイエンス

KEK と JAERI は 2007 年に 10 台の先行主力装置を建設予定である。これら 10 台のうち KEK は画期的な性能を持つ 4 台の装置建設を行う。

(2-a) 高性能中性子水平型反射率計

この装置は中性子反射率計で、世界最高の反射率 10^{-10} を実現させて、液体間の界面などの研究を行う。

(2-b) 超高分解能粉末回折計

世界最高性能の分解能を誇る粉末中性子回折計で構造解析を行う。驚くべきことは、その分解能 (0.03%) であり、これはシンクロトロン X 線で得られるものに匹敵する。両者を相補的に利用すれば構造科学において全く新しい扉を開けるものとなるであろう。

(2-c) 大強度全散乱回折計

大強度の全散乱装置であり、液体、ガラスや非晶質体などの無秩序系について非常に高い空間分解能と強度をもって研究を行い、特に機能性材料の階層構造を明らかにする。

(2-d) 高分解能チョッパー分光器

本分光器は高分解能を有する非弾性散乱装置であり、強相関電子系や磁性体、超伝導体や非晶質体といった系に存在する動的構造を研究し、物質機能の解明を行う。

(2-e) 中性子装置の開発研究

中性子散乱装置の研究開発は恒常的に行われるべきもので、これら「周辺装置」はどのような分

光器においてもその性能を実現させるためには必要不可欠なものである。KENS では限られたリソースの中でこれらの研究開発について非常に素晴らしいプログラムが行われている。KENS で得られた成果の大部分は J-PARC においても非常に有益なものになるであろう。以下にそのいくつかを挙げると、

1) T_0 チョッパーの開発：KEK 機械工学センターとの共同開発も充実し、J-PARC において欠くことのできない技術である。この開発は順調に進んでおり、そのプロトタイプが稼働している。

2) 中性子検出器の開発：特に、高い検出効率を有する位置敏感検出器（J-PARC においても必要）の開発。特筆すべきは、1 ミリあるいはそれ以下の分解能を有する MSGC (Micro Strip Gas Counter) 検出器の開発である。これまでの試験では非常に興味深い結果が得られている。

3) He-3 フィルター中性子偏極子：非常に良いスピン偏極保持時間が達成されている。現時点では、Rb スピン交換法によるプロトタイプが試験中であり、他の研究機関での開発と同等のレベルである。

4) 特に価値のある開発の一つは、東北大学との共同研究で行われた 32 テスラのパルスマグネットの開発である。これは中性子散乱実験において、世界で最も高い磁場の発生に成功したもので、J-PARC においても重要な技術開発である。

5) KENS は 2004 年 1 月に行われた中性子光学国際会議において重要なホスト役を務めた。中性子光学機器の開発、He フリーの大出力冷凍機、陽子偏極装置の開発等は現在進行中の開発である。

これらの開発研究は日本も含め世界各国で精力的に行われており、上記の研究活動は他の研究グループともより緊密な協力研究が行われている。さらに今後、限られたリソースも最大限有効に利用することによってこれらの技術を蓄積させてゆくことが可能であろう。

J-PARC への展望

(1) J-PARC 計画における KENS の役割

KENS は将来 J-PARC における大学共同利用の主体となり、JAERI は産業利用に対してサポートを担う。J-PARC は KEK と JAERI との共同運営がなされるであろうが、KENS 所員が JSNS に参画し、JAERI 所員と協力したサポートを外部ユーザー全体に対して行ってゆくことが自然であり重要である。25 年間に渡って KENS で行われてきた中性子源と装置の開発、大学間あるいは産業界との共同研究体制は特に重要である。今後、こういった共同研究体制は J-PARC との関係においても非常に有効となるであろう。

(2) 装置建設のための予算措置

JSNS は 23 台の分光器設置を 2012 年度までに目指すが、そのうち KEK は大学資金によるものも含め 10 台を、JAERI も 10 台を建設予定である。現在の限られた予算のため、2007 年の JSNS 完成までに KEK-JAERI 共同で 10 台のみの分光器を建設する。それゆえ KENS はそのうち 4 台について建設を進めてゆく。それらは、

高分解能粉末回折計

全散乱装置

水平型反射率計

高分解能チョッパー装置

である。KEK はそもそも JSNS における装置建設費を提案してきた。しかしながら、この提案は J-PARC 第二期に延期されている。中性子ターゲット施設の建設費が JAERI に配分されることが決まっている一方で、KENS では中性子関係のいかなる予算も KEK に配分がなされていないのである。これは予算計画としては非常に深刻な問題である。従って、本委員会は以下に示す提言をする。

(2-a) PS (KENS を含む Proton Synchrotron、素粒子原子核研究所、K2K ニュートリノ) がおそらく 2005 年に閉鎖される。これに合わせて KEK 側は現在の PS における活動を J-PARC に移行するための新規予算枠を要求するべきである。この新規予算を使用し、また、現存する KENS の装置を有効利用し、KENS は、上述の先行 4 台の装置の主たる部分を 2007 年の終わりまでに建設するべきである。

(2-b) KEK は大学共同利用の主体となる。大学との共同利用において、KEK はさらに 6 台の装置の建設を完了しなければならず、これは J-PARC が最大出力で定常運転される時期に合わせて行われなければならない。

(3) 人員

国際的な標準から言えば、一装置を稼働させるためには最低 5 人の人員を必要とする。従って、最終的には現在の所員 17 人から少なくとも 50 人体制が必要であり、KENS 所員の今後の増員が必要不可欠であることは明白である。それゆえ、人員に対する提案は JSNS における KENS の所有する装置台数の増加に併せた人員の増加を行ってゆくべきである。また、これまでに行ってきた大学共同利用を継続してゆくことも重要な要素である。現在の KENS 中性子源の規模で 17 人の職員体制で運営されてきたが、このシステムをそのまま J-PARC に移行できないかもしれない。J-PARC は大規模な研究施設であり、数千人規模の利用者を抱えることが予想され、それに合わせて職員の規模を拡大させることも必要であると同時に、異なる規範を設定することや様々な職務に対する職員の充当が必要である。

(4) 協力関係

2005 年から 2008 年の間は日本にパルス中性子源が存在しない期間となる。それゆえ、ISIS、IPNS、JRR3-M、ILL 等との協力関係が KENS 関係者を含む日本の研究者達の研究活動を維持してゆく上で欠かせない。KEK はこれに対する十分な資金援助を用意しなければいけない。

結論および勧告

1980年のKENS 運転開始時期から17年間にわたる活動を審査すべく、1997年に最初の評価委員会が開かれた。その結果では、KENSはパルス中性子源を利用した研究所として世界レベルの科学研究と中性子物理が遂行されていると評価された。

1997年以来KENSは大きな変革を遂げた。新しいターゲット（タンタル被覆されたタングステン）が導入され、その結果、2000年には中性子強度が20%増加した。また、現在までにいくつかの装置も新たに建設、あるいは改良された。最も特筆すべき点の一つは、KENSがJ-PARC計画において3GeV陽子加速器を利用したMWクラスのパルス中性子源(JSNS)を建設するに至ったことである。それゆえ、この第二回目の国際評価委員会は1998年から2004年の期間におけるKENSの活動状況を精査すべく2004年6月に招集された。KEK 戸塚洋二機構長から委員会に対して課せられた要求は、KENSにおける学術的、技術的活動を評価すること、J-PARC計画におけるJSNSを審査すること、あるいはPS閉鎖後J-PARC開始までの日本におけるパルス中性子源が存在しない期間にどのような形で活動を維持してゆくかを検討することにある。本委員会はKENS 所員によって行われた報告や提出された資料によってこれまでの成果と活動を十分理解した上で以下のような評価と提案を報告する。

1. これまでにKENSで達成された学術的、技術的な研究は世界的に観ても固体物性研究、中性子物理の分野についてたいへん重要な貢献に値するものと評価する。研究自身も非常に高い質を有しており、その成果は高度なものである。KENSに蓄積されているこれらの成果はJ-PARC計画においても大いに有益であり、他の施設では得難いものである。

2. KEKとJAERIは2007年までにJ-PARCにおいて先行10台の装置を建設予定である。そのうちKEKは4台の装置について、これまでにない時間・空間分解能を有する画期的な装置の建設の責務を担っている。委員会はこれらJSNSに設置される装置について、物質構造科学の先進的なかつ野心的な研究（例えば、ミリグラム程度の微量試料測定、液体-液体界面構造測定、ナノ構造研究、極限環境における強相関電子系の研究など）の新たな一歩になることを期待する。

3. KENSによってなされた仕事のうち強調されるべき事は、ターゲット、減速材、 T_0 チョッパー、中性子偏極フィルター、検出器、データ集積システムなどJSNSに必要不可欠な「周辺装置」の研究開発である。特に、JSNSに建設される装置は長い期間にわたって蓄積されたKENS所員の経験とノウハウなしには達成されない。

4. KEKにおいてこれまで装置開発予算枠が承認されていないのは驚くべき事である。本委員会は上述した4台の装置に関して、施設閉鎖中の分配予算額を増額して建設完成を目指す必要があることを強く提案する。加えて、J-PARC第二期におけるKEKの6台の装置についての予算配分を早い段階から検討すべきである。

5. KENS所員ならびに施設利用者は2007年JSNS開始までの間にかにして彼らの研究活動を維持してゆくのかという重大な問題に直面している。それゆえ、委員会はISIS、IPNS、JRR3-M、ILL等他の中性子施設との特別な連携を築くことによって、これまでの活動を継続、維持していただけるよう提案する。このことは現在の研究者のみならず、2007年に開始するJSNSの活動を始めるにあたっての若い世代（その後続く世代）にとっても非常に重要な問題となる。

6. KENSにおいてすばらしい成果を上げているものの、関係職員の不足は深刻な問題である。委員会の見解としてはKENSより提案された「30人以上の職員数増加を求める」案に同意する。KENSの将来、特にJ-PARCに向けての活動をより確実なものにするために以下の点が重要であ

ると考える。

(1) 施設内研究員の増加

(2) 「senior post-doc」制度の設置。これは全雇用期間を 2 年以上最長 5 年に渡って、優れたポストドクを雇用できる制度である。

(3) 大学院大学の学生数の増加。KENS 所員は中性子散乱の分野において若い世代の育成に力を注ぐ必要がある。

7 . KENS はこれまで ISIS や IPNS、LANSCE といった外国のパルス中性子施設との共同研究体制を推し進めてきた。こうした動きは今後も続けられ、インドネシア、韓国、台湾などアジア諸国との連携にまで拡大されるべきである。本委員会は、J-PARC 計画は世界の中性子の分野において基幹となることを十分理解し、KEK が価値のある技術開発、特にパルス中性子の技術開発についての国際共同研究を推進することを推奨する。

8 . KEK は三つの異なる粒子線施設、すなわち放射光・中性子・ミュオンを有し、物質構造科学の研究を行う上で、すばらしい環境にあるといえる。さらに、80 以上もの国立（行政法人）研究所、企業の研究所が集まるつくば市に位置していることも挙げられる。それゆえ、物質構造研究についてこれら研究機関相互の議論の場をつくり、より緊密な研究協力活動を行えるように指導的立場をとることが望まれる。

9 . 最後に、本委員会は日本政府と KEK に対して、J-PARC 建設予定を現予定以上に遅れることの無いよう取り計らいいただけるよう要請する。このことは、英国（ISIS）、米国（SNS）、日本（JSNS）間の対等な協力ならびに競争が遂行される上で非常に重要なことである。