J-PARCにおける研究の展望

J-PARC 利用者協議会

2009年5月21日

目 次

1	はじめに	4
2	素粒子物理学	5
	2.1 素粒子物理学の展開	5
	2.2 ニュートリノ	6
	2.3 K中間子	7
	2.4 ミュオン素粒子物理	8
	2.5 超低エネルギー中性子を用いた素粒子実験	8
	2.6 テストビームライン	9
	2.7 まとめ	9
3	原子核物理	10
	3.1 原子核物理の展望	10
	3.2 J-PARC でのストレンジネス核物理	11
	3.3 J-PARC でのハドロン物理	13
	3.4 施設等の要望	15
4	中性子	17
	4.1 序論	17
	4.2 結晶・応用材料	17
	4.3 非晶質・液体	18
	$4.4 \forall $	19
	4.5 強相関電子系	19
	4.6 水素系	20
	4.7 生命・生物	20
	4.8 中性子イメージング	21
	4.9 基礎物理	22
	4.10 まとめ:新しい物質観と新しい物質・材料の創出に向けて	22
5	ミュオン科学	24
	5.1 物質・生命科学に必要な新しい μSR 法の創出	26
	5.1.1 表面・界面ナノサイエンス/超低速ミュオンによる物質科学	26
	5.1.2 物質内部/低速ミュオンによる物質科学	27
	5.2 ミュオン触媒核融合/エキゾチック原子の科学	28
	5.3 素粒子物理学の基本問題としてのミュオン	28
	5.4 中長期的な展開	29
	5.5 まとめ	30

6	核変換	31					
	6.1 背景	31					
	6.2 概略	31					
	6.3 加速器駆動未臨界原子炉による核変換の研究	32					
	6.4 J-PARC での研究	33					
	6.5 J-PARC での研究実現に向けて	34					
7	産業利用	36					
	7.1 まえがき	36					
	7.2 産業分野共通のグランドデザイン	36					
	7.3 産業分野別	37					
	7.3.1 製薬・食品工業	37					
	7.3.2 鉄鋼・金属材料・機械(自動車部品)	37					
	7.3.3 ゴム・プラスティック・化学素材	37					
	7.3.4 磁石・磁性・記録材料	38					
	7.3.5 蓄電デバイス	38					
	7.3.6 燃料電池	38					
	7.4 利用拡大に向けて	38					
8	J-PARC 加速器の可能性と将来計画	41					
	8.1 はじめに	41					
	8.2 これまでのビーム試験結果と第一期性能の実現	41					
	8.2.1 加速器の性能	41					
	8.2.2 新たに導入した技術	43					
	8.2.3 加速器安定性·信頼性	44					
	8.2.4 性能の改善	45					
	8.3 MR 增強可能性	45					
	8.4 更なる長期的将来への備え	46					
9	J-PARC 利用者協議会が描く J-PARC における研究の指針と展望	48					
	9.1 初期:今後5年間	48					
	9.2 中期:今後10年間	49					
	9.3 長期:10年後以降	50					
	9.4 終わりに	50					
-	10 執筆者 52						

1 はじめに

J-PARC 加速器がいよいよビーム加速と取り出しを始めた。これからはビーム を安定に加速し計画通りの強度を出せるようにし、ビームラインや実験施設も充 実させ、拡充して行く必要がある。これらはいずれも時間と予算と人手がかかる ものであり、何を優先して進めて行くのか、ある程度の指針が必要である。さら に、こうした指針は目の前の問題だけではなく、将来の展望まで見越して立てな ければならない。

J-PARC 大強度陽子加速器施設は、素粒子、原子核、物性、生物、産業利用、と幅 広い分野の科学者とユーザーが世界から集まって利用する。したがって J-PARC を立ち上げ、発展させていくための指針は、それを使う利用者が主体となって作 るべきである。

以下、各分野がどのような大きな展望を持ち、J-PARC での科学をこれからど のように進めて行こうと考えているのかを述べる。本報告書では、今後5年間を 「初期」、今後10年間を「中期」、さらにその後を「長期」と呼ぶ。

また、J-PARC 利用者協議会で議論を重ねてまとめた共通の認識と指針を最後 に述べる。

2 素粒子物理学

2.1 素粒子物理学の展開

素粒子物理学では、その根幹を揺るがす発見が近いと国際的に認識されている。 即ち、欧州原子核研究機構(CERN)の大型ハドロン衝突型加速器(LHC)での 陽子・陽子衝突実験が始まろうとしており、これに続いて国際リニアコライダー (ILC)での電子・陽電子衝突が計画されている。これらの最高エネルギーの実験 において、素粒子の質量の起源ヒッグス粒子や、重力も含めた力の統一に決定的 役割を果たす超対称性などの画期的な発見がなされ、それに続く研究によって新 たな学問体系へ脱皮することが期待されている。

我が国の素粒子物理学のコミュニティーは、これら最高エネルギーの物理が最 重要だが、同時に相補的なフレーバーの物理も推進するというマスタープランを 遂行する。フレーバー物理は、なぜ物質を作る基本単位であるクォークとレプト ンの種類(フレーバー)が3世代12種類存在し、異なる質量を持ち、異なる世代 で混合しているのかという根源的な疑問を研究するものである。フレーバー物理 の実験においては、KEKのBファクトリーでの成功¹、スーパーカミオカンデに おけるニュートリノ振動の発見に象徴される世界を凌駕するニュートリノ実験の 成功がある²。

これらを踏まえて、素粒子実験分野は J-PARC を完成させ、J-PARC から神岡 のスーパーカミオカンデ測定器にニュートリノを飛ばしてニュートリノ振動を測 定する 長基線ニュートリノ実験 T2K や、中性K中間子稀崩壊実験などの素粒子 物理学の根幹に迫る研究を行なっていく。世界が注目するこれらの実験では加速 器の強度が決定的に重要であり、プロジェクトの基本としてまずは加速器が規定 の強度を出すことを最優先にするべきである。特に国際競争が激しく、また国際 的期待が極めて高い国際共同実験 T2K の成功には、メインリング (MR)の大強度 化が必須である。

図1に J-PARC で計画されている素粒子実験についてまとめる。将来的には、 J-PARC 稼働時期から始めた実験の成果をみて、ニュートリノ実験の次期計画、 ミュー粒子の電子への転換やミュー粒子の異常磁気モーメント g-2の精密測定、超 冷中性子を用いた電気双極子の精密測定などの、本質的な物理に関わる実験を立 ち上げていく。これらの学問の本質に迫る実験を行なう長期計画を踏まえ、将来 的にこれらの実験を盛り込む可能性を考えて、将来のビームライン拡張を慎重に 計画するべきである。また、様々な測定装置の試験や開発のためのテストビーム ラインの建設を早急に行うべきである。

¹小林誠博士・益川敏英両博士のノーベル物理学賞の契機には KEKB 加速器と Belle 実験の成功がある。

²小柴昌俊博士が 2002 年にノーベル物理学賞を授賞されたカミオカンデ実験が研究の発端である。



図 1: J-PARC で計画されている素粒子実験

2.2 ニュートリノ

J-PARCで大強度ニュートリノビームを生成し、295km 離れたスーパーカミオ カンデで観測し、世界最高感度でニュートリノ振動を研究する実験がT2K(Tokaito-Kamioka)実験である。ニュートリノ振動現象は、ニュートリノ質量がゼロでな い証拠であり、素粒子の標準模型を超える物理の存在を示している。ニュートリ ノ振動は複数の種類のニュートリノが混合した結果として起こり、ニュートリノ 混合行列³を使って記述できると考えられている。このニュートリノ混合行列は、 クォーク間の混合を説明する小林・益川行列に対応しているが、クォークと異な り、ニュートリノでは第1世代のニュートリノと第3世代のニュートリノの間での 混合現象がまだ発見されていない。この現象の発見が、ニュートリノ物理の重要 テーマで、T2K実験の第1目標でもある。この第1世代と第3世代のニュートリ ノの混合の大きさは、ニュートリノ混合行列中のパラメータθ₁₃を使って記述でき る。θ₁₃がゼロでないことが発見され、ニュートリノ混合行列が確立できれば、小 林・益川模型同様に、ニュートリノでの粒子と反粒子の対称性(CP対称性)の破 れが予想できる。我々の宇宙には反陽子、反中性子、陽電子で構成される反物質 が存在しないので、宇宙創成の途中でCP対称性が破れたと考えられる。しかし、

³ニュートリノ振動を予言した牧・中川・坂田・ポンテコルヴォのイニシャルを取って MNSP 行列と呼ばれている。

宇宙創成のシナリオで、どこで、どのように CP 対称性が破れていたかは分かって いない。宇宙創成の謎に迫るには、未知の CP 対称性の破れを発見することが重要 で、ニュートリノ振動における CP 対称性の破れは期待される候補の一つである。 ニュートリノ振動実験の大きな目標の一つは、この CP 対称性の破れの研究であ る。また、ニュートリノ振動の研究を通してニュートリノ質量の起源を究明する ことは、素粒子物理学の力の統一理論へのアプローチとして、超高エネルギーの 物理を探る一つの重要な手法となっている。

T2Kでは、θ₁₃がゼロでないことの発見を第一目標に、ニュートリノ混合行列と ニュートリノ質量差の精密測定を行う。T2Kには世界12ヶ国から総勢400名の研 究者が集まり、国際的に高い期待を受けている。その結果は素粒子分野の将来計 画を決定する上で決定的に重要であり、J-PARCが早期に設計値のビーム強度に 到達し実験結果が出ることが期待されている。

世界では、 θ_{13} 発見に向けて、米国と欧州で加速器ニュートリノ実験が進行中で あり、またフランス、中国、韓国で原子炉ニュートリノ実験が準備中である。ま た、T2K と同程度の感度をもつ新しい加速器実験が米国で承認されている。T2K がこれらの実験に遅れをとらないよう、早期から十分な強度での J-PARC 加速器 の運転が望まれる。

θ₁₃発見後は、T2Kのアップグレードとして、J-PARCの大強度化によるニュー トリノビームの増強と、スーパーカミオカンデを超える新しい高性能ニュートリノ 測定器の建設が考えられる。特に、CP対称性の研究は、大強度のニュートリノビー ムを必要としている⁴。新しい測定器としては、スーパーカミオカンデの 10 倍以 上の大型水チェレンコフ測定器ハイパーカミオカンデや液体アルゴン TPC (Time Projection Chamber)が考えられている。ニュートリノ測定器は、陽子崩壊探索に も優れた性能を有しており、力の統一理論の証拠である陽子崩壊探索を視野に入 れた開発が必要である。また T2K の結果によっては、CP 対称性に対する実験感 度を最適化するための測定器設置場所の検討も必要となる。

2.3 K中間子

1964年に発見された CP 対称性の破れは、近年の K 中間子と B 中間子の実験に よって、小林・益川が提唱した「クォーク間の混合に入る複素位相」で説明され ることが明らかになった。しかし、この複素位相だけでは宇宙に物質がある事を 説明できず、標準理論を超える新しい物理による別の CP 対称性の破れが存在す るはずである。こうした新たな CP 対称性の破れは $K \rightarrow \pi \nu \bar{\nu}$ 崩壊に寄与する可 能性がある。これらの崩壊の分岐比が、B 中間子崩壊から小林・益川の理論 (標準 理論)を使って予測される分岐比と食い違えば、これは新しい物理の発見につなが る⁵。CERN では $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊の実験が準備されており、J-PARC では中性の

⁴KEK ロードマップにある 1.7MW へのビームパワーの増強が必要。

⁵LHC で超対称粒子が発見されたとしても、それらのフレーバーの物理については *K* や *B* 中間 子による実験が必要であり、これらの実験は相補的である。

K中間子の崩壊 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の実験を行う。

J-PARCではまず KEK で用いた実験装置を移設して改造して K 中間子実験 (E14 実験)を行い、パルス当り 2×10¹⁴ 個の陽子を用いて $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の発見をめ ざす (Step 1)。次に、小角度で K_L に最適化したビームラインと、より大きな崩壊 領域と検出効率を持つ測定器の建設を行い、パルス当り 3×10¹⁴ 個の陽子を用い て 100 事象以上観測して崩壊分岐比を測定する (Step 2)。その後は、さらなる分岐 比の精密測定を行う、あるいは測定器を改造して $K_L \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$ など他の関連した 崩壊から新たな物理を研究する、などの道がある。

また、これらの実験と平行して、 $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ 崩壊を用いて時間の対称性の破れを現在よりも一桁よい感度で探る実験が現在計画されている。

2.4 ミュオン素粒子物理

幾多の先見的な実験が示してきたように、既知の粒子の精密計測は標準模型の 正当性の裏付けだけでなく、新物理への手懸りとなる可能性を秘めている。ミュ オンは1937年の発見以来、重要な役割を担ってきた。

ミュオン磁気双極子能率 (g – 2)の研究はそのような研究の一つである。近年、 BNLで実測値と標準模型予想値との有意な差が報告され、さらに高精度の実験が 望まれている。 J-PARC では、5章で述べるミュオン施設で方向のそろった超低 速ミュオンを生成して小型の高精度の電磁石の中で回すという、新たな手法の実 験が検討されている。

多数行われてきたミュオン崩壊様式の研究は、結果として標準模型を超える物理 の探索となっているものも多い。このうちレプトン数非保存崩壊モードの研究は、 超対称性の寄与を実験的に検証できる可能性がある。現在計画中の J-PARC にお けるミュオン実験(COMET 実験)では、ミュオンが原子核中で核子とのコヒー レントな相互作用により電子に転換する事象を探索する。この事象では、ミュオ ン世代数は保存されず、単色エネルギー(ミュオンの質量と束縛エネルギーの差) の電子が観測される。この実験では J-PARC の大強度の陽子ビームをパルス状に して用いる。実験グループでは、2010 年代の実験開始に向けて、分岐比に対する 実験感度 10⁻¹⁶ を目指し、開発研究を進めている。

2.5 超低エネルギー中性子を用いた素粒子実験

J-PARC の大強度ビームは世界最高密度の極低エネルギー中性子 (UCN)の生成 を可能とし、中性子を用いた素粒子物理研究 (新物理の探索、中性子寿命の超精密 測定、重力の研究等)の次世代の世界的拠点となる。とくに電気双極子能率 (EDM) の測定はこれまでの感度 (3 × 10⁻²⁶ e cm)をあと2桁向上させることで超対称性 理論等が予言する領域をほぼ網羅でき、LHC における研究と相乗的に極めて重要 な発見となる。測定精度の鍵は J-PARC の大強度ビーム、超流動 He を用いた新 型 UCN 発生装置 (KEK/RCNP 等)および中性子光学を駆使した高密度 UCN の貯 蔵と偏極技術である。新型 UCN 源は RCNP で稼働中であり既に世界最高密度の UCN の発生に成功している。また 4.9 章にあるように、中性子光学は冷中性子を 用いた先端的研究が精力的に進められている。現在検討中の計画案では J-PARC の LINAC 最下流ビームダンプ付近に専用新型 UCN 源を設置し、ボトルに貯蔵さ れた UCN を用い EDM 測定を行う。LINAC ビームの 10% を用いることで、現在 世界最高感度を達成しているフランスの ILL⁶に比べ 3 桁近い高い密度の UCN を 貯蔵測定でき、スイスの PSI⁷(2009 年開始予定)、カナダの TRIUMF(2012 年頃開 始を計画中)を凌ぐ世界最高感度の研究を行うことが可能となる。これによって 10⁻²⁸ e cm の領域での EDM 測定を目指す。

2.6 テストビームライン

素粒子物理学の発展には、物理の根幹をに迫る革新的な実験を可能とするため の最先端の測定装置の開発が必要となる。この最先端測定装置の開発に利用でき る自由度の高い荷電粒子ビームライン(テストビームライン)が、J-PARC に早期 に整備されることを希望する。

2.7 まとめ

J-PARCでは、大強度陽子ビームから生成される多彩な大強度・高品質2次ビームを利用することで、世界最高感度を有する素粒子実験が可能である。すでに準備中のニュートリノ実験やK中間子実験においては、世界中から多数の研究者が参加し、素粒子実験の国際的研究拠点として重要な役割をJ-PARCは担っている。 J-PARCの成功は、国際的に期待されている"早期の設計強度での加速器の運転"が重要となる。将来的には、ニュートリノ実験のアップグレード、ミュー粒子や超冷中性子を使った素粒子の基本性質を探究する実験の展開が考えられており、素粒子物理学の根幹にかかわる発見が期待されている。

 $^{^{6} {\}rm Institute}$ Laue-Langevin

⁷Paul Scherrer Institute

3 原子核物理

3.1 原子核物理の展望

この宇宙に存在する様々な物質は、基本粒子クォークが「強い相互作用」で互い に結びついた複合系によって形づくられている。図2に示すように、ビッグバン 後の初期の高温状態では、物質はクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)⁸の形 で存在していたが、宇宙の膨張による冷却によって相転移を起こし少数のクォー クが閉じ込められたハドロン (バリオンとメソン)⁹となり、その際にカイラル対称 性¹⁰の破れによって軽いクォークからなるハドロンが大きな質量を獲得する。安 定なハドロンである陽子の一部は互いに融合して軽い原子核が作られる。こうし て生まれた水素やヘリウム原子核は、その後電子をまとって中性原子となり、重 力で凝縮して恒星を作り、その内部で核融合反応が進んで次々と重い原子核が作 られ、さまざまな元素が誕生する。特にウランにいたる重い原子核は、超新星爆 発の瞬間に一気に合成されたと考えられている。一部の恒星では超新星爆発後中 心部が低温の高密度核物質からなる中性子星となり、相転移を経て超伝導状態の クォーク物質になっている可能性も示唆されている。このような宇宙における物 質の進化の全体像を理解し、多様な物質の成り立ちを解明することが、現代の原 子核物理学の役割である。

高温での QGP の存在とその性質は、米国 Brookhaven 研究所 (BNL) の RHIC 加 速器を使った高エネルギー原子核衝突実験で解明が進められており、欧州 CERN 研究所のLHC加速器でさらなる高温状態の研究へと展開される。また、陽子・中 性子の多体系である原子核については、特に陽子数と中性子数のバランスが大きく 偏った核の存在形態とその特異な性質や、天体でのウランにいたる全元素の合成 過程の解明を目指して、世界中の様々な加速器施設、特に理研の RI ビームファク トリー (RIBF) によって活発に研究が進められている。ハドロンの構造と性質は、 世界中の様々な加速器施設で研究が進められているが、J-PARC ではハドロンの 研究をさらに進展させることができる。また、低温の高密度核物質については直 接的な実験データはないが、このような核物質中ではストレンジクォークが出現 していると考えられており、J-PARC で進められるストレンジネス核物理の研究 の成果(ストレンジクォークを注入した原子核やストレンジクォークを含むバリ オン間相互作用の性質)によって低温高密度核物質の理解が大きく進展すると期 待されている。なお、宇宙での物質進化の全体像を理解するには、素粒子・宇宙 分野との連携も重要であり、そのような研究もいくつかのフロンティアで進めら れている。

⁸基本粒子クォークと、クォーク同士の力(強い相互作用)を媒介する粒子グルーオンとがバラ バラになっている状態。

⁹ハドロンは複数のクォークが固く結びついてできた粒子で、クォーク3個からなるバリオン (重 粒子) とクォーク・反クォークからなるメソン (中間子) がある。核子 (陽子と中性子) はバリオン。 ¹⁰質量ゼロのクォークのスピン右巻きと左巻きのものそれぞれがもつ対称性。



図 2: 宇宙における物質(クォーク多体系)のさまざまな姿とその進化を、クォー ク多体系の相図(横軸が密度、縦軸が温度)の上に示した図(本文参照)。

3.2 J-PARCでのストレンジネス核物理

高いエネルギーでのクォーク多体系の振舞いは量子色力学 (QCD)¹¹によってよ く理解できるが、ハドロンや原子核といった低いエネルギーでのクォーク多体系の 振舞いは極めて複雑で、QCDから直接理解することは難しく、さまざまな半現象 論的な模型によって記述されている。ストレンジクォークの質量はこれら2つの 異なるエネルギー領域の間にあるため、ストレンジクォークを含んだハドロン系を 理解することは、長年の課題である低エネルギーと高エネルギーをつなぐクォー ク多体系の描像の確立にとって大きな役割を果たす。これがストレンジネス核物 理分野の意義である。

ストレンジネス核物理を代表するハイパー核(ストレンジクォークをもったバ リオンであるハイペロン (Λ 、 Σ 、 Ξ など)を含んだ原子核、図3参照)の研究は、 1990 年代以降、KEK 陽子シンクロトロンや米国 BNL AGS 加速器において、日本 人研究者が中心となって進めたさまざまな実験によって大きく発展した。J-PARC ハドロンホールでは、KEK の数百倍の強度の K 中間子や π 中間子ビームが得られ るので、反応確率の小さな現象も調べることができるようになり、ストレンジネ ス核物理の飛躍的な進歩が期待される。

(1) ハイパー核・ハイペロン核子散乱の研究

様々なハイパー核の構造やハイペロン・核子散乱のデータを蓄積し、ハイペロン・核子 (YN) やハイペロン・ハイペロン (YY) 相互作用を調べ、核力をバリオン

¹¹クォーク間に働く強い相互作用の基本理論。



図 3: J-PARC で研究が進められるさまざまなハイパー核。ストレンジクォーク をもったバリオンであるハイペロン (Λ 、 Σ 、 Ξ)を含んだ原子核である。

間力として統一的に理解することを目指す。中性子星内部の高密度状態ではハイ ペロンが出現していると予想され、高密度状態の性質(密度や、陽子、中性子、各 種ハイペロンの存在比)は、YN、YY相互作用に大きく依存する。J-PARCの実 験によってこれらの相互作用が明らかになると、中性子星内部の物質の姿が解明 できる。また、原子核の基本的性質の理解にとって本質的な役割をもつ核力の短 距離部分の起源をクォーク描像によってどう理解するかは長年の重要な問題であ るが、クォークの種類を変えた核力である YN, YY 相互作用の性質がわかれば、 クォーク模型や量子色力学 (QCD) に基づく理論計算¹²を通して、核力のクォーク 描像を確立することができる。

まず、Ξハイパー核分光実験およびΞ原子のX線測定を世界で初めて行ってΞ の核ポテンシャルを調べ、ΞN相互作用の強さを導出する(初期¹³)。さらに相互 作用のもつ重要な性質(スピン・アイソスピン依存性やΞN-ΛΛ結合力など)も明 らかにする(中¹⁴・長期¹⁵)。また、様々なΛΛハイパー核を観測してΛΛ間相互作 用を正確に導出し、また核内で2つのΛが6個のクォークの結合状態(Hダイバリ オン)になっていないかどうかを調べる(初期)。さらに、Λハイパー核精密ガンマ 線分光法を用い、軽い核から重い核まで様々なハイパー核の精密な構造データを 蓄積し、そこから ΛN相互作用の詳細を解明し、また核内でのΛ粒子の性質変化 を研究する(初・中期)。特に、ガンマ線分光によって測定できる核内でのΛの磁 気モーメントは、カイラル対称性の部分的回復のメカニズムやバリオンのスピン の起源にも手がかりを与える。また、中性子過剰Λハイパー核構造に大きな影響を及 進める(初期)。ハイパー核の核図表を拡大し、ハイパー核構造に大きな影響を及

¹²最近、近似的ながら QCD による核力の第一原理計算が可能になってきた。

¹³初期:J-PARC 稼動後数年の間に実験ホールの拡張なしにできる実験

¹⁴中期:稼動後10年以内に可能な実験。ハドロンホールとビームラインの拡充を想定。

¹⁵長期:稼動後 20 年以内に可能な実験。実験によってはさらなるビームライン増設や偏極・重 イオン源などの設備増強が必要。

ぼす ΛNN 三体力を解明することができ、中性子星内部の理解にも重要な役割を 果たす。さらに、高分解能 π ビームラインを建設して従来の 10 倍の分解能で重い 核や中性子過剰核を含む Λ ハイパー核の系統的な精密分光研究を行うとともに、 Σ ハイパー核も調べ、YN 相互作用の詳細と核内バリオンの性質を調べる(中期)。 将来的には、 Ω ハイパー核¹⁶やチャームクォークを含むハイパー核の生成にも挑戦 する(長期)。

一方、低エネルギーの ΛN 、 ΣN 、 ΞN 散乱実験によって、これらの相互作用を直 接測定する実験も推進する(中・長期)。これらの実験は、これまで高統計データ が得られなかったが、現在進行中の新しい検出器の開発とビーム強度増大によって 克服できる。長期的には偏極量の測定や偏極標的による実験も行い ΣN 間や ΞN 間のスピン軌道力やスピン・スピン力も測定する(長期)。

(2) *K* 中間子原子核の研究

ストレンジクォークをもつ K^- 中間子は陽子との間に引力を及ぼしあうため、 K^- と原子核が束縛状態をつくることが予想されていたが、最近、 K^- 中間子と原 子核との極めて深い束縛状態の存在を示唆するデータがいくつか報告された。 K^- が核内で核子を引き付けて核密度を増大させ高密度核物質状態を生成している可 能性や、中性子星中で K 中間子が出現して凝縮している可能性も議論されている。 J-PARC では、まず He などの軽い原子核に対する K^- 原子のX線測定から K^- と 原子核の相互作用を調べ(最初期)、さらに K 中間子原子核の生成過程と崩壊過程 を同時に測定して K 中間子原子核の存否を確定させる実験を行う。存在が確認さ れた場合には、K 中間子核ポテンシャルの性質を詳細に調べる(初期)。さらには 2つの K^- を含む超高密度核を人工的に生成できる可能性もある(中・長期)。

3.3 J-PARCでのハドロン物理

陽子・中性子をはじめとするハドロンは、我々の物質世界を形作る基本要素でありながら、その基本的属性である質量・スピンの発現機構や構造が、いまだに理解されていない。J-PARC では大強度ハドロンビームを用いて以下のハドロン物理¹⁷の研究を行い、これらの課題の解明を目指す。

(1) ハドロンの質量発現のメカニズム(カイラル対称性の破れ)の研究

南部の理論によると、軽いクォークがカイラル対称性の自発的破れによって本 来の100倍近い質量を獲得し、ハドロンが現実の質量をもつことになったと考え られる。一方、核内ではカイラル対称性は部分的に回復していて、そのためにハ ドロンの質量が軽くなると予想されており、それを示すデータが KEK-PS 等で得 られている。そこで、高運動量の陽子やπビームで生成したφ、ω等のベクトル中 間子の核内での質量変化を詳細に測定し(初期)、また、原子核にベクトル中間子

 $^{^{16}\}Omega$ 粒子は、ストレンジクォークを3つもつバリオン。

¹⁷ハドロン単体を研究する分野を「ハドロン物理」、ハドロン多体系を研究する分野を「核物理」 と分類している。

が束縛された中間子核を生成してその構造を調べることにより、カイラル対称性 回復のしくみを調べる(初・中期)。

(2) 核子構造の研究

核子は、低エネルギーでの強い相互作用の複雑なダイナミクスの結果として、複 雑な構造をもつ。また、核子構造の情報は、LHCを含む高エネルギーのハドロン 衝突反応を理解する上でも不可欠である。

主に電子との散乱を用いて詳細に調べられて来た核子構造は、特にその量子数 の担い手である価クォーク(アップクォークやダウンクォーク)については精密 な理解が進んできた。その一方で、核子内にどういう種類の反クォークがどう分 布しているのか、反クォークやグルーオンが核子全体のスピンをどの程度担って いるのかなどの理解はまだ十分進んでいない。

歴史的には、高運動量ビームと核子や原子核標的との衝突反応において、核子 内部のクォークと反クォークが仮想的に光子になり電子・陽電子などのレプトン 対に転換する現象 (Drell-Yan 過程) を調べることで、核子内部の反クォーク分布 が調べられてきた。J-PARC では、比較的低エネルギーで大強度というビームの 特徴を生かして、これまで他の加速器で調べられていない Bjorken x^{18} の大きい 領域 (0.2 < x < 0.6) が調べられる (中期)。さらに、偏極陽子ビーム¹⁹を使って Drell-Yan 過程やチャームクォーク生成過程を調べて偏極陽子中のクォーク・反 クォークおよびグルーオンのスピンの向きや、軌道角運動量などの分布を測定し、 いまだ謎である核子スピンの起源を解明することも目指す (長期)。

(3) ハドロン分光、エキゾチックハドロンの研究

ハドロンは、長年3つのクォークからなるバリオンとクォーク・反クォークか らなるメソン(中間子)のみが観測されていた。強い相互作用の基本理論である 量子色力学が、ハドロンが"白色"²⁰であることを要求し、そのミニマムな形態が バリオンとメソンであることから、バリオンとメソンのみが観測されるのは自然 なことと考えられていた。一方、4つや5つのクォークからなるハドロンであって も、白色ならば存在できるはずだが、そのようなものは長年観測されなかった。

しかし、最近4つのクォークからなると解釈されるハドロンが Belle 実験などで 発見され、核力の強い引力を担うσ中間子を4つのクォークからなるハドロンとみ なす可能性も指摘されるなど、さまざまなハドロンの存在形態をクォーク多体系 としてどう理解すべきかという基本的な問題が問い直されている。また、SPring-8 で発見され話題となった幅の狭いペンタクォーク(5つのクォークからなるバリオ ン)については、肯定的・否定的実験結果があり存在自身が確立していない。

J-PARCではハドロンビームによるペンタクォーク生成の有無を確定し(最初期:稼動後1年程度)、その幅や性質を詳しく調べる実験(初・中期)や、glue ball

¹⁸ 陽子の運動量のうち、その中のクォークやグルーオンが担っている運動量の割合を示す量。 ¹⁹陽子のスピンの向きがそろったビーム。

²⁰クォークには"色"と呼ばれる属性があり、各クォークは"赤""緑""青"のどれか、反クォー クは"反赤""反緑""反青"のどれかの色をもっている。バリオンでは [赤、緑、青]、メソンでは [赤、反赤] のように、ハドロン内のクォークの色は合わせて白色になっていなければならない。

などの他のエキゾチックなハドロンの探索(中・長期)を進め、重いクォークを 含む Belle 実験のハドロンデータとは相補的な、軽いクォークからなるハドロンの データを蓄積し、ハドロンの世界の全体的な理解につなげる。

3.4 施設等の要望

図4,5にビームラインごとに示した実験スケジュールとそれぞれの実験で使用 するビーム強度を示す。第1期計画では複数のビームラインの設置が予定されて いたにもかかわらず、現状では二次ビームラインが一本(K1.8とその分岐ライン K1.8BR)しか整備されておらず、既にPACで採択されている、緊急に成果をまと めるべき課題(Ξハイパー核の存否やΛハイパー核のガンマ線分光(3.2節(1))、K 中間子原子核の存否(3.2節(2))、ペンタクォークのハドロン反応生成(3.3節(3)) など)に取り組むだけでも3年以上が必要である。K1.1ライン(とその分岐ライ ンK1.1BR)を早急に設置してK1.8と同時に使用することにより、合計の実験時 間は半減し、ビーム強度2倍以上分の効果が生まれる。K1.1BR ラインは、低エネ ルギーK⁺ビームによるペンタクォーク確定実験や $K\mu_3$ 崩壊での時間反転不変性 破れを探索する素粒子実験にも使用できる。また、高運動量ビームラインの設置 により、ハドロン質量の発現機構の研究(3.3節(1))や核子構造の研究(3.3節(2)) などの重要な研究を開始できる。これらはJ-PARCの計画当初から目標として掲 げてきた研究課題であり、責任をもって研究成果をまとめあげる必要がある。

図5に示すように、π中間子ビームを用いる実験など主リングからの陽子ビーム 強度が弱い段階で十分実施できるものもあるが、所期の強度(100%)を必要とする 実験も多く、それらこそが J-PARC で初めて実現可能となる新分野を拓く研究で ある。そのためには、初期における陽子ビーム強度が速やかに所期の性能を達成 することが不可欠であり、ビームライン整備と並行して、リニアックエネルギー を 400 MeV ヘ早期に回復させることが必要である。また、初期における共同利用 実験のサポート体制は、これらの研究を進めるうえできわめて重要であり、各実 験チームへの充分な実験経費と実験旅費の割り当ても必要である。

ハドロンホールの拡張とこれによる第2生成標的の設置、二次ビームラインの 拡充整備は、初期の設備では不可能であった、高分解能 π 中間子ラインによる重い Λ ハイパー核などの高分解能分光や、高運動量Kラインによるストレンジクォー クを2つ含む重いペンタクォークなどのエキゾティックハドロンの分光、 Ω ハイ パー核の生成など、新たなタイプの研究を可能にするものである。また、ホール拡 充により、本格的な中性K中間子ビームラインを用いたK中間子稀崩壊実験や、 ミュオンビームによる μ -e 転換や異常磁気能率測定などの大型素粒子実験をも実 施可能とすることができる。

さらに中・長期的には、偏極ビームや重イオンビームも加速することによって、 核子のスピンの起源や、RHIC加速器での実験よりもより高密度の高温核物質の性 質を調べることを目指したい。

	FYH21	FYH22	FYH23	FYH24	FYH25	FYH24	FYH25	FYH26
K中間子原子 K中間子核、η中間子核								
К1.8	K1.8 整備 ペンタクォーク Λ核(中性子過剰、γ分光、弱崩壊)、ΛΛ核、Ξ核、Ξ原子、φ,0中間子核、ΞN散乱							
K1.1BR)	整備 ペンタクォーク、Σ核、K中間子核							
К1.1		整備	ΣΝ•ΛΝ	散乱、∆核γ分光	、∧核弱崩壊、Θ核	ŧ		
高運動量		整備	カイラ	ル対称性回復	Drell Yan、チャー	- <u>ム生成 チャ</u> ー	-ム生成(偏極)	高温高密度状態
ー次ライン 高分解能			ホール拡張	整備		▲剰核、重核)•Σ	核の高分解能分	↑ 光
<u>πライン</u> 高運動量				整備	Drell Yan、ハドロ	レ分光、重いペン	ンタクォーク、KK相	δ、Ω核、チャーム核
Kライン					整備			
ビーム								
重イオン ビーム						-	SE VIII	
● 互いに同時には使えないビームライン K1.8(BR), K1.1(BR), 高運動量Kラインは質量分離ラインであり、								

他のビームラインは同時に使える

K中間子だけでなくπ中間子や反陽子も供給できる

図 4: ビームライン整備と実験実施スケジュールの希望。



図 5: それぞれの実験で必要とする実質的な陽子ビーム強度 (Linac を 400 MeV に 回復して実現する 30 GeV 15 µA を 100%とする)。右矢印で示すように、表示よ りも高い強度の陽子ビームも使用可能であり、その場合は二次ビームを絞って使 うため、一般にビームの純度やビームの絞りを向上させることができる。

4 中性子

4.1 序論

物質・生命の基礎科学は、多くの物質を研究することで、物性の普遍性と個別 性を明らかにし、物質の多様性の起源をできるだけ単純な原理や概念で理解しよ うとする。さらにこれにより新しい物質観の創成や、新しい物質・材料の創出に も貢献する。中性子は、1)高い物質透過性、2)水素原子など軽元素による強 い散乱、3)スピンによる強い散乱、4)物質中の原子やスピンの動きに対する 感受性などの特徴を持ち、散乱強度の空間分布や物質透過度を精密に調べること で、物質を構成する原子やスピンの構造と動きが研究できる素粒子である。研究 対象とする物質も非常に幅広く基礎物理も含めると、まさに「素粒子から日常材 料」にまで及んでいる。実際の研究では、中性子の物質に対する散乱、透過、吸 収という性質が利用される。散乱には、弾性散乱や全散乱による構造研究と非弾 性散乱による原子やスピンの動きを調べる分光研究がある。透過ではレントゲン 写真のように物質内部の構造を直接観察できる(中性子イメージング)。また中性 子の吸収の際発生するガンマ線のエネルギー分光から微量元素分析ができる。現 状はこれらの装置を高性能化し、異なる装置で目的に合わせた研究を行っている。 そのため中性子では特徴ある数多くの装置が必要となる。中性子科学会は、この 利用者協議会の文書に先立って、J-PARCの物質生命科学実験施設(MLF)に設 置されるべき装置のグランドデザインを、初期(中性子強度も含めて定常的安定的 な運転に至るまでの直近の5年程度)、中期(定常的運転下で成果が期待される10 年程度)そして長期(中期での成果をもとに新しい展開が期待される 20 年程度) に分けて提示した。しかし数多くの装置でやみくもに多くの物質を研究するだけ では、新しい原理や概念の創出は難しく、それには考え抜いた戦略が必要である。 この章では成果の期待できる分野に特に注目し、各分野での研究戦略をまとめる。 ここでは、1)結晶・応用材料、2)非晶質・液体、3)ソフトマター、4)強相 関電子系、5)水素系、6)生命・生物、7)中性子イメージング、8)基礎物 理の分野をとりあげた。これらの分野では、中性子の持つ特徴を生かし、J-PARC 以前にも活発な研究がすでに行われているが、J-PARCにおいても、物質・生命の 基礎科学を牽引していく分野として期待されている。しかし中性子という手段の 物質研究に対する柔軟性から考えて、J-PARCにおいては、これら以外の分野が台 頭してくる可能性や、分野融合などの可能性もあり、既成の分野だけに留まらな い新しいサイエンスの創出の可能性を常に模索していくことが必要である。

4.2 結晶・応用材料

物質の構造研究の目的は、(A)高温超伝導、巨大磁気抵抗等で代表される特異 な物性の発現機構を構造的観点で解明すること、(B)有用な機能を持つ物質の創 成を構造科学の立場で開拓することである。(A) では構造と物理量の関連を定量 的に研究する構造物性学を確立させる。また、(B) では(A) に加えて、合成への フィードバック、実用条件下での構造変化の研究をもとに膨大なデータベースの 構築が必要である。初期は、J-PARC ですでに達成した世界最高の分解能や大強 度を武器に、様々な物質の結晶やスピン構造のデータベースの構築と、その温度、 圧力、磁場等の外場応答を調べ、これまでにない非常に高い精度での物性と構造 との関係に関する研究が行なわれる。中期では、構造データベースを利用した実 際の材料創製サイクル(創製と解析の短時間フィードバック) に加えて、更なる 極端条件下(超高圧、超強磁場、超高温など)での新奇物性の探索や、パルス磁 場、電場印加に対する構造の時間変化など非平衡状態下での構造研究も行われよ う。J-PARC での構造物性研究は、室温超伝導など、これまで夢と考えられてい た新奇機能物質の開発の突破口を開くことが期待される。

4.3 非晶質・液体

非晶質・液体では、構造的な乱れや揺らぎに起因する、結晶にはない特徴的な 物性が発現する。構造に決まった周期性がないため、揺らぎの周波数と空間周期 が幅広く分布しており、中性子散乱信号が弱い。そのため物性解明に必要な構造 の精密決定には J-PARC の大強度中性子散乱による研究が不可欠である。初期で は、J-PARCに設置される分光器 (NOVA 等) の高い分解能と高強度により、非晶 質・液体のイオン伝導体や水素貯蔵材料などにおける局所構造の詳細と原子やイ オンの輸送現象について研究が進むと期待される。水、水和水および超臨界溶液 などによる反応化学では、同位体置換法による超臨界状態における溶媒和の原子 レベルでの観測、溶液中におけるタンパク質や核酸・脂質などの生体関連分子の 立体構造の決定など機能発現に対する水和水分子の役割が明らかになると期待で きる。さらに偏極中性子の利用は、これまで不可能であった軽水素が関わる反応 プロセスの直接観測をも可能にする。これらの研究は、非晶質や溶液の学問体系 の進展のみならず、非晶質を使ったデバイス創製や、超臨界状態の産業利用の活 発化、新しい化学反応物質の創製などに大きく貢献することが期待される。中期 から長期では、短波長中性子を集光可能なデバイスを用いて、微小領域の過渡現 象の研究が発展する。その結果、界面構造とダイナミクス、ナノクラスター構造 とダイナミクス、過冷却液体状態及びガラス転移における構造とダイナミクスの ナノサイズ効果が重要課題となる。これらの研究により非平衡状態やナノ状態の 学問的解明が飛躍的に進展し、非平衡状態やナノ状態の工学活用が飛躍的に発展 すると期待される。

4.4 ソフトマター

液晶、高分子、ゲル、コロイド、エマルジョン等の広範囲な物質群を包含するソ フトマター分野を特徴づける構造柔軟性は、その構造の階層性に強く起因してい る。そのため、広い空間スケールと時間スケールにわたる研究が必要である。ソ フトマター分野では、裾野を広げる研究とサイエンスピークを立てる研究が戦略 的に J-PARC で同時進行する。初期では、急速に建設が進むことが期待される2 台の反射率計による表面・界面研究が大きな成果を生み出す。特に顕微鏡では観 察が不可能な物質内部の機能を持つ界面の研究に大きな進展があると予想できる。 中期にかけては小角散乱装置(HI-SANS)を主体としたナノ構造と機能の関係解 明が進む。パルス中性子の特徴を利用した広い波数範囲での測定においては、広 い空間スケールにまたがる複雑な階層構造を有する有機・無機ハイブリッド材料 などの機能と構造の相関解明が急激に進むと思われる。長期ではナノ物質の外場 応答と機能に関わるダイナミクス研究が、今後建設されるスピンエコーや高分解 能非弾性散乱装置を用いてなされると考えられ、新たなサイエンスと産業応用の 世界を切り開くと期待される。このような J-PARC におけるこれまでにない精緻 な構造と機能の関係解明は、鉄より強い高分子、プラスチックエンジン、ゼロ摩 擦表面などいままで夢と思われてきた高性能物質の開発への道を開く。

4.5 強相関電子系

物質の機能性に直接関わる電子間の電気的反発力が強い物質群が強相関電子系 である。この系では、特に超伝導などの電気特性と磁性が強く相互に関係し、温 度、圧力、磁場、電場などで、これらの性質が劇的かつ多彩に変化する。磁性研究 を得意とする中性子にとっては重要な研究分野である。ここでは分光物性の立場 からの研究展望を述べる。高温超伝導や超巨大磁気抵抗効果などに代表される強 相関電子が引き起こす新奇な現象の理解には、金属中の電子の振る舞いをよく説 明すると考えられた従来のフェルミ液体論では不十分で、強い電子相関を取り入 れた新しいモデル (強相関電子論) が必要となっている。初期では、強相関電子系 の励起状態(磁気励起、格子励起)をチョッパー分光器などによる分光法で定量 的に決定し、いくつかの強相関電子論の予想と比較検討することが課題の中心と なる。その際、磁気励起と格子励起強度の精密な分離が重要で、偏極中性子をい かに活用するかが問題となる。中期では、遷移金属酸化物などの強相関電子の自 己組織化に伴う、電子相分離や電荷不均一現象を分光法でいかに統一的に理解す るかが大きな課題の一つになろう。そのためには、測定可能なエネルギーや運動 量領域をもっと拡大し、数 eV 領域から数 µeV 領域での励起の研究を行う必要が ある。特に数 eV 領域の結果は電荷の揺らぎを見るX線非弾性実験との定量的つ き合わせが行われるであろう。さらに長期は、励起状態の外場(磁場、電場など) に対する時間変化や、ミクロ空間に閉じこめられたスピン系のダイナミックスが、

スピントロニックスの発展と歩調を合わせて進むと予想される。また階層構造を 持つ複雑な強相関電子系の層内のダイナミックスや層間の交差現象、また結晶の 周期性を持たない非晶質における強相関電子系の磁気励起は、挑戦的テーマの一 つである。

4.6 水素系

X線ではほとんど見えない水素が中性子ではよく見える。中性子散乱にとり水 素原子は、特別な存在である。また、宇宙に存在する水素の量(水素の宇宙存在 度)は、他の主要元素に比べても桁違いに多く、水、有機物、生物など人類に取 り重要な物質を構成している。同時に、水素原子はトンネリング、大振幅ゼロ点 振動、核スピンなど量子性を強く持つ特異な原子である。その結合様式は多様で あり、分子、有機物、無機物中で共有結合、陽・陰イオン結合、金属結合を形成 し、それが水素の構成する物質の多様性を創出している。すなわち、オルソ-パラ 転移、2 量体分子における高速プロトン移動、同位体効果、金属中の高速拡散、生 体関連物質中のプロトン移動、希土類金属の水素化による金属-絶縁体転移、金属 格子欠陥中の水素クラスター形成など多くの基礎的な現象を醸し出す原因となっ ており、生命・物質における水素の役割に関する基礎研究は、初期 ~ 長期にかけ て常に主役の座にある。この分野の発展に果たす中性子の役割は大きい。水素原 子のもつ量子性に着目した基礎研究が進展すると、金属水素に匹敵する常温超伝 導体の創出、新しい水素貯蔵物質の創成、水素から光へのエネルギー変換、常温・ 常圧燃料電池の開発、環境調和型の水中・常温・常圧での酸化還元反応の開発、そ して核スピンを用いた量子デバイスの開発のための基本概念が明らかになる。

4.7 生命・生物

現在、放射光X線を利用したタンパク質等の構造研究に基づいた重要国家プロ ジェクトが日本を含む先進各国で強力に推進されている。これを加速し、タンパ ク質の構造・機能研究にさらに重要な知見を与えるのが中性子による研究である。 波長0.1 nmの中性子エネルギーは室温での平均熱エネルギーと同程度であるので、 中性子はタンパク質のダイナミクス(揺らぎ)を調べるのに格好のプローブとな る。したがって、タンパク質の機能や生命現象の分子的基礎を理解するためには、 構造と機能という既存のパラダイムだけではなく、中性子の非弾性散乱を利用し てタンパク質の構造・ダイナミクス(揺らぎ)・機能という新たなパラダイムの構 築が必要である。また、真核細胞(特に細胞の核内)における新しい分子認識機構 として最近注目されるようになった天然変性タンパク質の研究では、タンパク質 の構造の揺らぎが分子認識において非常に重要な役割を担っていることが明らか にされ、J-PARC での高分解能非弾性散乱装置(DNA)から得られる成果に大き な期待が集まる。一方、中性子の弾性散乱を利用した構造研究では、結晶化が困 難な生体超分子複合体(タンパク質や核酸の有機的集合体)を対象に、重水と軽 水の比を変化させた溶液コントラスト変調法やスピンコントラスト変調法を利用 した中性子小角散乱法(SANS)による全長構造解析が挙げられる。また、タンパ ク質の結晶構造解析では、近年の高輝度マイクロビーム放射光の開発によりタン パク質分子の水素原子の多くが観測されるようになり、中性子を利用したタンパ ク質の水素原子や水和水の観測はX線においても可能になってきた。したがって、 中性子とX線の特長を最大限に生かしながら両プローブを相補的に利用し、相乗 的な効果を生み出すサイエンスを行ない、タンパク質の機能と密接に結びついた 生命システムの構造研究を目指す必要がある。

このようなことから、初期においては、建設されたタンパク質専用の構造解析 装置をいくつかの標準物質やタンパク質を用いて詳細に評価するとともに、生理 活性を有する有機化合物の構造解析や比較的分子量の小さいタンパク質の構造解 析を行い、構造・ダイナミクス(揺らぎ)・機能の相関研究の基礎を構築する。そ して、中期以降は、対象を複数のドメインやサブユニットから構成された細胞生 物学的に重要な巨大タンパク質に発展させて、DNA や SANS からの揺らぎや全長 構造解析と中性子・X線結晶構造解析による水素原子を含めたドメインやサブユ ニットの精密構造解析を組み合わせて、他の物理化学的な方法では解析できない タンパク質の構造・ダイナミクス(揺らぎ)・機能の相関研究を推進していく。こ のように中性子の弾性散乱と非弾性散乱とX線(弾性)散乱を総合的に組み合わ せて利用することにより、タンパク質及びタンパク質複合体による細胞機能の制 御機構が原子・分子レベルで明らかにされ、化学の言葉で細胞の働きが語られる 時代もそう遠くないものと期待される。

4.8 中性子イメージング

中性子イメージングは、レントゲン写真のように実空間で物質内部の構造を直 接観察できる手段である。J-PARC では中性子のエネルギー選別や偏極中性子の 活用により、構造物性や分光物性とも密接に関連する新しい中性子イメージング の展開も期待される。初期では、設計のための基礎データ蓄積とエネルギー選別 型イメージング技術の開発で世界をリードし、応用利用のための基礎研究を進展 させる。これにより、原子炉の積分型の高感度中性子イメージングとパルス中性 子のエネルギー選別型イメージングの相補的研究が展開し、中性子イメージング 分野が広汎に進展する。中期以降では、エネルギー選別型イメージングをさらに 発展させ、組織構造イメージを取得するなど特徴的な応用を展開する。特に、冷 中性子領域から共鳴吸収領域にわたる広い範囲エネルギー選別型イメージングを 進展させ、実用分野への利用に発展させる。すなわち、高エネルギー分解能のイ メージングにより、熱外 (共鳴)中性子を用いた元素分布、温度分布測定、冷中性 子による構造選択性を用いた歪みや残留応力分布測定などを行う。さらに、偏極 中性子による磁気イメージング、位相コントラストを利用した領域境界を強調し たイメージングを発展させる。

4.9 基礎物理

初期では、冷中性子を用いた素粒子物理学(中性子崩壊・未知相互作用探索・中 性子干渉・電気双極子能率など)を推進するとともに、原子力工学上の基礎及び 天体核物理のための核データ計測を推進する。これらの研究の過程で発展する中 性子光学(中性子源・光学系・検出系を含む)の物質研究への応用を推進する。中 期以降では、中性子光学技術を基盤として、熱外領域から超冷領域に渉るエネル ギー領域全般において素粒子・原子核研究を推進する。ただし、その推進におい ては MLF の枠組を超えて研究を展開し、2.5 章で述べられている中性子の電気双 極子能率 (EDM) 測定など基礎物理における世界拠点を形成する。また中性子光学 技術の研究に基づいた新しい中性子ビーム利用方法の開拓に寄与する。

4.10 まとめ:新しい物質観と新しい物質・材料の創出に向けて

各分野の戦略をまとめると、長期以降では構造物性学と分光物性学の結合への 具体的試みが、無機材料だけでなく、ソフトマターや蛋白質などの生体物質も含 む広い物質群で始まることが強く予感される。さらには構造の長さスケールと揺 らぎの時間スケールが大きく異なる物質群を統一的な原理や概念からまとめる研 究がスタートする可能性もある。また中性子とは相補的情報を与えるX線散乱や ミュオン分析、核磁気共鳴あるいは光電子分光やトンネル分光など、さらにそれら の情報を総合的に考察する理論との協力体制、融合研究がますます重要となって くる。「素粒子から日常材料」という幅広い物質を研究対象とする中性子はこのよ うな新しい研究をリードしていく必要がある。個々の分野におけるロードマップ は上述したが、中性子分野全体として、今後20年の重要な装置、測定技術の進展 およびそれにともなうサイエンスの進歩を J-PARC ビーム強度の発展とともに下 図に示した。30年後の予想は困難ではあるが、この線上を超えるものでなくては ならない。そのためには、1)現在のパラダイムを変えるような物質科学を構築す るための中性子実験は何か、2)夢物語のような物質の創製に必要な条件探索に 中性子をいかに使うか、3)既存のエネルギーや運動量領域を超えた先の新しい 中性子の使い方は何か、4)高性能偏極中性子や超高分解能ビームの発生とその 利用実験技術をいかに進展させるか等の課題に継続的に取り組み、中性子の革新 的手法を開発する必要がある。このためには、20年を待たずに、現在の J-PARC 中性子のビームラインの数も中性子強度も不十分となる。将来に向けてビームラ インの分岐や第2ターゲットステーション(TS)の設置に向けて今から準備をす ることが求められる。このロードマップ実現には、サイエンス主導の運営組織の

確立と、もう一つの中性子源である JRR3 との緊密な連携体制、さらに今後物質 科学の爆発的な進展が予想される東アジア地区との協力、そして中性子の進むべ き道を自ら切り開く若い研究者が数多く育つことが前提となることは言うまでも ない。



図 6: 今後 20 年の中性子分野の重要な装置、測定技術の進歩とそれにともなうサ イエンス全体の発展。サイエンスの発展は、まず精密な構造解析から始まり、広 い空間スケールでの階層構造解明へと進展する。次に分光測定による物質相互作 用とダイナミクスの研究が外場応答を包含する形で発展する。さらにその融合と して、非平衡状態での構造とダイナミクスが解明され、物質の時空構造の統一概 念の構築へと繋がる。

5 ミュオン科学

物質を原子レベルの領域から眺めた世界には全体を外部から見ただけでは知り 得ない情報が溢れている。このような「微視的測定」は現代の多種多彩な物質研 究には欠かすことが出来ないものであり、今日ミュオンを用いた測定はその代表 的な存在となっている。ミュオンを用いた物質・生命科学研究は約30年前に始ま り、この間日本の研究者が多くの新手法を切り開き、世界のリーダーシップをとっ てきた。また物質・生命研究のみならず、エネルギー生産から素粒子に至るまで のあらゆる科学の領域を網羅し、ミュオンを用いた科学は将来的に更なる発展が 期待されている。日本におけるミュオン科学は、J-PARCの世界最強のパルス状 ミュオン、パイオンビームを使用できるアジア唯一のミュオン施設 (MUSE)を有 することにより、今まさに生まれ変わらんとしている。新たな科学の創生と発展 に向けて、J-PARCの将来計画に大きな期待が寄せられている。

J-PARC ミュオン施設 (MUSE) のミュオン標的、並びに関連の陽子ビームライ ン系は平成 20 年度に完成し、性能評価のために既存設備を移転したテストビーム ラインを用いて、高速ミュオン (長尺のソレノイドを飛行中の π[±] が崩壊して得ら れる正負ミュオン; 5-50 MeV) 並びに低速ミュオン (4 MeV 正ミュオン) を生み 出すことに成功した。今後 5 年間に、速やかに整備しなければならないビームラ インとしては、超低速ミュオン (eV-30keV) ビームライン、低速ミュオンビーム ラインが挙げられる。図 7 に各々のミュオンビームの打ち込み深さの違いを示し た概念図を示す。図 8 に J-PARC ミュオン施設の全体計画図を示す。とりわけ世 界に類をみない大強度超低速ミュオンビームは国内外のミュオン科学研究者から 切に待ち望まれており、J-PARC ミュオン施設の国際評価委員会においても最優 先課題として遂行すべきと評価されている。



図 7: 超高速ミュオン、高速ミュオン、低速ミュオン並びに超低速ミュオンの打ち 込み深さの違いを示した概念図



図 8: J-PARC ミュオン施設の全体図

5.1 物質・生命科学に必要な新しい *µ*SR 法の創出

21 世紀に物質科学が目標とするのは、「自在な物質設計による機能の発現と制 御」である。物質の機能と基本となる性質を決めるのは物質中の電子であり、従 来にない視点から電子の状態を原子レベルで「見る」ことができる手段、つまり |機能の起源をより正確に「評価」する手段を開発することにより、物質の「設計・ 合成・評価」という循環をより高度に洗練されたものへと進化させることができ る。素粒子ミュオンを用いた物性評価法であるミュオンスピン回転・緩和・共鳴 法(µSR)は、スピン偏極ミュオンを物質中に打ち込み、ミュオンの静止位置の磁 場を知ることで周囲の「局所的」な電子や水素の状態を探る手法である。中性子 線やX線を用いた方法や核磁気共鳴 (NMR)、電子スピン共鳴 (ESR) と補完的で あり、現在、物質の全体像理解に欠くことのできない手段となっている。これは、 銅酸化物高温超伝導体の研究、あるいは半導体中の水素(=ミュオニウム:ミュオ ンと電子の束縛状態、水素の同位元素とみなせる)の研究等を通じて前世紀最後 の四半世紀に確立されたものである。次の四半世紀にミュオン科学が目指す目標 は uSR をさらに高度化し、様々な先端技術と組み合わせることにより、今まで見 えなかったものを見えるようにすることである。そのために、以下のような目標 設定とそれに付随する施設整備が行なわれなければならない。特に、エネルギー 領域の異なるビームを供出する複数のビームラインの整備が必須となる。

5.1.1 表面・界面ナノサイエンス/超低速ミュオンによる物質科学

我々が目で見ることができるのは物質の表面である。表面は物質において唯一 外界と接している特別な層であり、表面に近い部分も含めて物質の奥深い部分と は異なる興味深い性質を持つ。超低速ミュオンビームは、パルス状ミュオンビー ムとパルス状レーザーと組み合わせるという最先端のビーム技術であり、J-PARC の大強度陽子ビームにより初めて実現されるものである。超低速ミュオンは、加 速器で作ったミュオンを、熱した金属箔等に照射し、そこから「蒸発」して空間に 漂うミュオニウムをレーザー光の照射により共鳴イオン化させ電子と解離させる ことで得られる。この超低速ミュオンは、電場で最加速することにより、打ち込む 深さをナノメータースケールの高空間分解能で変えることが可能であり、表面か ら物質内部への電子状態の移り変わりを連続的に調べることができる。表面、サ ブサーフェスおよび、これまでほとんど分析手法が無かった"界面"の解析も可能 となる画期的な研究プローブである。レーザー光照射時間幅が、超低速ミュオン ビームの時間分解能を決めるので、パルス状ミュオンでは不可能な、高速ミュオ ンスピン回転実験が可能となり、さらに、ビーム径が小さいので、これまでは測定 ができなかった微小な試料の実験が行える。このように超低速ミュオンビームは 従来のミュオンビームでは不可能であった研究を可能とする。特に、正ミュオン は、物質中で水素原子として振る舞うので、研究手法の少ない表面近傍の水素研 究、触媒反応や電池等の研究の新プローブとなると期待されている。μSR 法の適 用対象を飛躍的に拡大することから利用者に待ち望まれているビームである。超 低速ミュオンビームは、10 年以上にわたり日本が独自に開発してきたもので、日 本が世界に向け発信する新たな実験手法である。例えば多層薄膜での界面の磁気 的性質やダイナミクス、水素原子の表面-サブサーフェス界面に存在する電子状態 や運動を、微視的に調べることができる。光学的測定が困難な半導体中で、偏極電 子の移動現象を微視的に観測する事によってスピントロニクス研究にも大いに貢 献することができる。またナノ構造の電子状態の新測定手段として、特に、隠れた 界面を非破壊で探れる事により、革命的役割を果たす事が期待されている。これ らの新たなミュオン科学の研究分野が、J-PARC において新しく形成される。更 に、陽子ビーム強度が 1MW に至り、短時間での測定が可能となった際には高品質 ビームを3次元的にスキャンし、ナノ構造物質に関して局所情報の3次元マッピ ングを得るなど、大強度化で初めて可能となる測定も多い。

超低速ミュオンスピン回転緩和法は、既に技術的な開発はほぼ完了しつつある。 数年以内に J-PARC に専用ビームラインを設置し、それによって世界に先駆けて 物質科学の新たな研究手法と領域を生みだすことが至上目標となる。

5.1.2 物質内部/低速ミュオンによる物質科学

低速ミュオンによる μSR は表面から離れた物質内部の性質を見ることができる 数少ない原子レベルのプローブであり、超低速ミュオンと相補的な情報を得るこ とができる。低速ミュオンとはミュオン生成標的内で発生した正パイオン (π+) が標的表面付近で 崩壊して飛び出してくる µ+ (運動エネルギー= 4 MeV)を指 し、J-PARC の1 MW 達成時においてそのビーム強度は約 $10^7 \mu^+/s$ 、と文字通り 世界最高強度に達する。大強度表面ミュオンビームによる研究は従来に比べ格段 に高精度の測定を可能とし、微小な内部磁場検出を通じて電子状態を探る優れた プローブとなる。この低速ミュオンは汎用性が高いことから従来から多くのユー ザーに利用され、磁性体、半導体、超伝導体といった物質研究や、産業応用を目 指した研究など様々に活用されてきた。さらに生命研究のプローブとしても威力 を発揮し、生命現象の基礎となるタンパク質の機能を、その構造からだけでなく 電子状態も含めて調べる上で、物質科学研究と同様に生命研究に対しても μSR は 独自の貢献をすることができる。J-PARCの大強度ビームによる高統計実験はこ れまでより1桁以上高い精度で物質内部の電子スピンのダイナミクスやミュオニ ウムの運動などを検出でき、これまでの精度では埋もれていた現象を見出すこと が可能となる。このような「超高精度 µSR」による研究は新たな知見をもたらす ものと期待され、幅広い科学の発展に貢献する。ビームは4つの実験ポートへ輸 送され、同時に異なる実験することができる。またパルスビームという時間構造 を活かすことにより、超強磁場下や光やレーザー照射など様々な条件の下での物 性評価が行われ、µSR が内部の局所状態のプローブとしての威力を発揮していく。

多数のユーザーに多彩な実験環境下での低速ミュオン実験の場を提供することが MUSEにおける第二の目標となる。なお、物質科学は高速ミュオンビームライン でも行われ、高圧下の物性研究や、負ミュオンによる物質研究などビームライン の特色を活かした研究が展開される。

5.2 ミュオン触媒核融合/エキゾチック原子の科学

負ミュオンは原子核に束縛されて「ミュオン原子」という新たな原子状態を生 成する。特にミュオン原子となった水素とその同位体は高速で核融合反応を起こ し、その際負ミュオンは触媒としての役割を果たす。現在、その素過程の解明から 核融合率の高効率化まで、幅広い観点での研究が進行しており、「ミュオンを人工 的に生み出すのに必要なエネルギー < ミュオンが核融合により作り出すエネ ルギー」の関係が達成された暁には、エネルギー生産源としてミュオンが世界を 変えることになる。核融合率は、核融合の過程で生じたアルファ粒子に負ミュオ ンが付着してしまう現象が核融合の連鎖反応を阻害する大きな要因となり、まだ エネルギー生産には至っていないが、上記の関係の半分という折り返し点に近づ きつつある。さらに自由電子レーザー等の利用によりアルファ粒子から負ミュオ ンを引き剥がすことによる核融合率の大幅な向上が模索されており、長期的な研 究が行われていく。また J-PARC では、このような水素同位体が形成するミュオ ン原子の研究をさらに発展させる。そのために中期的な計画として、超高速ミュ オンビームラインの整備を行う。特に、3 GeV 陽子ビームの利用により負のミュ オンの収率は他のミュオン施設と比べて大きく、高温高圧下でのミュオン触媒核 融合の研究に必要不可欠な手段である。また、高圧下での $\mu^{\pm}SR$ 実験などの物性 実験だけでなく、μ⁺μ⁻ コライダーの為の高エネルギーミュオンビームの冷却技術 を確立するための研究が可能となるといった複合効果も期待される。

5.3 素粒子物理学の基本問題としてのミュオン

ミュオンは、電子の次に安定なレプトンとしてこれまで様々な素粒子・基礎物 理実験の研究対象とされてきた。例えば、崩壊寿命の精密測定によって標準模型 の基礎パラメータの一つであるフェルミ結合定数が測定され、超微細構造乗数の 決定に関しても大きく寄与している。これらの測定に関する精度は、基本的には 統計精度によって決定されており、世界最高強度のパルス状ミュオンビームを供 給できる MUSE においてはその飛躍的向上が期待される。さらに g – 2 の高精度 測定²¹、あるいは反ミュオニウム(負のミュオンと陽電子の束縛状態)の生成とそ の分光等、大強度パルス状ビームを活かし、標準理論を越えた現象を探索するこ とを目指している。

²¹素粒子の 2.4 節、原子核の 3.4 節を参照



図 9: 陽子ビーム強度の上昇と共に拡がるミュオン科学研究

5.4 中長期的な展開

また 今後 10 年の展望として計画されている超高速ミュオンビームラインでは、 π 中間子由来ミュオン(正・負)ビームだけでなく K 中間子由来の高運動量ミュ オン(正)ビームも得られる。これらのビームは、5.1、5.2、5.3章に示された研究 テーマに加え、ミュオンラジオグラフィーなどに応用され、巨大な機器の内部探 索を行う産業目的や使用済み核燃料棒のウラン残量の評価などに実用化される。

今後20年を目処に整備を進める計画として、新たに第2ミュオン標的を設置し、 そこから延びる新たなミュオン2次ライン計画が検討されている。ミュオン生成 標的に隣接して大立体角捕獲系を設置することにより、現状の第1ミュオン標的 での強度を2桁上回る大強度のミュオンビームが得られる。このようなビームラ インを整備することにより、物質研究においては、従来より遥かに広い時間領域、 特にサブミリ秒領域に至るまでの緩和現象を捉えることが可能となり、素粒子原 子核の分野でも超高強度レーザー場下でのミュオン崩壊、ミュオン変換事象の研 究等、大強度パルスビームを活かした計画が検討されている。

5.5 まとめ

J-PARC ミュオン科学実験施設 (MUSE) は、その世界最高強度を活かして 21 世 紀の科学をリードすることが最大の存在理由である。そこでの最も重要な目標は 「ミュオンを用いることにより、従来見えなかったものを見えるようにする」こと であり、これは現在その主要な応用対象である物質・生命科学はもちろん、長期 的には素粒子物理の主要な研究テーマの一つである標準理論を越えた現象を探索 することをも含む。ミュオン科学実験施設の整備はようやくその緒に就いたばか りである。速やかに超低速ミュオンビームライン、低速ミュオンビームラインを 整備することが肝要である。

6 核変換

6.1 背景

持続的なエネルギー供給は世界的課題であり、原子力エネルギーは必須のエネ ルギー源である。原子力発電は、現在あるいは近い将来必要とされる電力を 100 %担うポテンシャルを持つ技術であり、また、その本質的な課題の多くは既に解 決されてきた。同じく人類共通の課題である二酸化炭素排出の増加に伴う地球温 暖化は、一部の地域で現実の問題としても露見し始めている。2008 年に開催され た洞爺湖サミットでも持続的発展のための重要課題とされ、解決策のなかで原子 力発電の役割が重要であることが示された。仮に原子力発電所の設置が自由に許 されるのであれば、二酸化炭素放出の問題などは容易に解決でき、石油などの貴 重な化石燃料をより本質的な用途に利用することができる。しかしながら、原子 力エネルギーに対する不安がこのような進展を妨げる一因となっている。そのよ うな不安の源は、原子力発電所の事故への不安と長寿命放射性廃棄物による将来 に対する懸念の二つに整理できる。このうち後者の問題は、放射性毒性を長期に 亘って持続する物質を「万年」を超える遠い将来まで残して良いのか? という観 念的・根源的な問題に繋がる。それは、原子力発電の技術としての完結性への疑 問でもある。

「核変換技術」は、この長寿命放射性廃棄物の問題を解決する技術である。長寿 命放射性原子核を安定あるいは短寿命な原子核に変換することにより、遠い将来 の不安を我々世代の時間内で対処することを可能とし、原子力を真のエネルギー 生成技術として確立させるものでもある。以下、核変換に対する J-PARC を用い た研究について説明する。

6.2 概略

原子力発電を発展的に継続していくためには、最大の課題の一つである放射性 廃棄物の処理処分の問題を解決する必要がある。原子力発電に用いられた核燃料 は、燃料中に残る核燃料物質であるウラン・プルトニウムを回収し、残った不要 な物質を高レベル放射性廃棄物(HLW: High Level Waste)としてガラス状に固化 して、安定な深地層に処分する。国土が狭く、安定な深地層の限られる日本では、 HLW 処分場を可能な限り効率的に利用していくことが重要である。

分離核変換技術とは、HLW 中に含まれている放射性物質を、その特性に応じて いくつかの元素群に分離し、長期にわたって強い放射性毒性を保持するマイナー アクチノイド(MA: Minor Actinide)をはじめとする元素群、発熱性物質、有用 元素、その他の短寿命・安定核種など、個々の特性に応じた処理・処分を行うこと で、HLW の処分に関わる経済的な負担や環境に与える負荷を大幅に軽減すること を目指した革新的技術である。特に、数千年から数万年という長期にわたり強い 放射性毒性を有する核種については、中性子を用いて原子核の種類そのものを変 換する核変換技術により、より短い期間(数100年)で安定化する核種又は放射能 を持たない安定核種に直接変換することで、時間スケールの短縮による処分負担 の低減を狙っている。この技術を用いることにより、例えばHLW 処分場の使用期 間を、現在想定している 30 年から 150 年に大きく引き伸ばすことが可能になる。

6.3 加速器駆動未臨界原子炉による核変換の研究

核変換を行う手段として、既存の臨界状態(核分裂が連鎖的に維持される状態) となる原子炉により行なう方法と、原子炉を未臨界状態(原子炉自体のみでは核分 裂連鎖反応を維持できない状態)として、加速器などを用いて外部から中性子を供 給することで未臨界炉を駆動する加速器駆動システム(ADS: Accelerator-driven System)による方法が考えられている。前者は、発電と同時に核変換も行う方式 であるが、合理的な発電コストや安全性を担保するため、MA の可処分量に限界 がある。特に、現在の軽水炉世代から高速炉世代への移行の際に発生する大量の MAへの対処が課題となっている。また、発電用燃料に関連する全ての工程(燃料 製造、保管、再処理ならびに各施設間の輸送など)に MA が混合されるため、その 取扱いやコスト面で課題が生じる恐れがある。一方、後者は MA を発電サイクル から分離し、それぞれに最適な発電・処理方式を採用することができるのが特長 となる。核変換に用いる ADS では、原子炉を未臨界状態で運転するため、廃棄物 中の MA を高濃度で使用できるほか、加速器のビームを停止するだけで原子炉を 確実に停止できるなどの大きな利点がある。しかしながら、運転に必要となる外 部中性子源を発生させるためには高エネルギーで大電流の陽子ビームが必要にな る。また、大強度の陽子ビームにより原子炉を駆動する技術、高濃度の MA を含 む燃料の取扱い、原子炉の安全性や運転性能など、ADSの開発には多くの技術課 題が存在する。このため、J-PARCの陽子ビームを活用して、ADSや核変換技術 についての実証研究、技術開発を進めることが不可欠である。図 10 に ADS 実用 化までの過程を概略的に図示した。原子力システムである ADS 実用化までの過程 は、軽水炉や高速炉の段階的な開発過程(極低出力の原子炉(臨界実験装置)→原 型炉→実験炉→実証炉・実用炉)に準拠している。現在は基礎的な研究(コールド 試験:陽子ビームを使用しない)を行う第一段階であり、第二段階が J-PARC で 予定している ADS による核変換の実証研究(kW 級出力の加速器を使用)である。 この J-PARC での研究を踏まえ、第三段階では実験炉級 ADS を開発してシステム 総合実証(MW級出力の加速器を使用)を行い、第四段階である実用段階(10MW 超の加速器を使用)を目指す。

6.4 J-PARC での研究

J-PARCでは、核変換実験施設(TEF: Transmutation Experimental Facility)の 建設を計画している。TEFは、ADS概念及び核変換技術の基礎的な実験を行うた めの施設^{22 23} であり、2000年の国の第三者評価では「順次建設すべき施設(第 II 期計画)」に分類されている。2008年度より実施された原子力委員会による分離変 換技術研究のレビューを受け、2010年度より開始される JAEA の第二期中期計画 期間中の着手を目指した検討を進めることを期待する。図 11 に TEF 施設の鳥瞰 図を示す。

TEF は、低出力の陽子ビームと核燃料を用いて核変換に関する原子炉物理実 験を行う臨界実験装置を設置した「核変換物理実験施設(TEF-P: Transmutation Physics Experimental Facility)」、及び、核破砕ターゲットを用いてターゲット構 成材料の照射ならびにターゲット本体に関する技術開発を行う「ADS ターゲット 試験施設(TEF-T: ADS Target Test Facility)」の二施設から構成する。両施設は J-PARC リニアックの終端部に配置され、600MeV-200kWの陽子ビームを導入す る TEF-T とリニアックとの間に設置された陽子ビーム導入機構(レーザー荷電変 換装置)を介して TEF-P への最大出力 10W の微小出力陽子ビームを供給する構 成となっている。

TEF-Pは、核変換対象核種である MA を含有した燃料を使用可能な高速中性子 増倍体系と核破砕中性子源を組み合わせた施設であり、ADS をはじめとする MA 含有燃料を用いた原子炉に関わる物理現象の研究を目的としている。強い放射線 と崩壊熱のため従来施設では取扱いが困難な MA 含有燃料を利用する専用の保管 設備や遠隔操作機能を有し、核変換効率の測定や計算機シミュレーションによる 原子炉特性予測精度の検証、ADS 設計に必要な核種の断面積測定等を行うことが できる。また未臨界状態の炉をリニアックからの陽子ビームによる核破砕中性子 を用いて運転することで、ADS のための様々な未臨界炉物理実験が実施可能であ る。TEF-Pに供給する陽子ビームについては、実験に応じてレーザー荷電変換装 置を調整することにより、J-PARC の他施設の運転に影響を及ぼさずに強度やパ ルス幅(最大 500µs)を変更できることも、本施設の特長である。

TEF-T は、核破砕ターゲットや高速炉心冷却材として有望視されている鉛・ビ スマス溶融合金について、工学的な試験研究を行う施設である。主に、陽子ビー ム窓などの陽子ビーム導入部、燃料被覆管や炉内構造物等の液体金属雰囲気中で の材料照射効果に関して、温度・冷却材流速・照射量等をパラメータとした系統 的なデータの取得などを実施する予定である。

²²H. Oigawa *et al.*: "Conceptual Design of Transmutation Experimental Facility", International Conference on Back-End of the Fuel Cycle, GLOBAL2001, 10-13 Sep., 2001, Paris, France (2001).

 $^{^{23}{\}rm T.}$ Sasa et al.: "Conceptual Design Study of the Transmutation Experimental Facilities" , Proceedings of the 5th International Topical Meeting on Nuclear Applications of Accelerator Technology, AccApp/ADTTA'01 (CD-ROM) (2002).

これまで、施設建設を進めるための基礎データに関する研究(上記第一段階)を 行っており、TEFで用いるさまざまな実験設備や技術について開発の見通しが得 られている。例えば、TEF-Pの臨界実験装置としての「水平2分割型」臨界集合 体構造、MAからの高い発熱を効率よく冷却するためのピン形状の燃料、高発熱・ 高放射線の燃料を遠隔で操作する設備、J-PARC加速器のパルス運転に対応した原 子炉出力計測設備、臨界集合体に入射する陽子ビームを供給するためのレーザー 荷電変換装置、密封二重管型核破砕ターゲット、ビスマスの放射化により生成す るポロニウムの捕集技術などについて研究開発を実施しており、J-PARCでの施 設建設に必要な技術開発はおおむね完了している。

6.5 J-PARC での研究実現に向けて

文部科学省の大強度陽子加速器計画評価作業部会報告書では、「核変換実験施設 の整備については、原子力政策全体の中で検討していく必要があり、今後、原子 力委員会等の評価を踏まえて進めていくことが適当である。」と記載されており、 2008年9月より原子力委員会において分離変換技術研究に関する評価が行われて いる。2006年には、J-PARCセンターにより実験施設に対する研究提案 (Pre-LOI: Preliminary Letter Of Intent)の募集が行われた。国内外の大学、研究所の約130 名の研究者から約40件の研究提案があり、併せて欧州のADS開発プロジェクトで ある EUROTRANSからの実験参加表明が寄せられている。さらに、今後の施設実 現にはユーザーコミュニティからの発信が極めて重要であるとの認識から、2008 年7月より日本原子力学会に「アクチノイド・マネジメントに関する炉物理実験 施設」研究専門委員会を設置し、日本原子力学会の炉物理部会を中心としてユー ザーの意見集約と施設の具備すべき要件の提案を進めている。

J-PARCは、原子力による持続的な発展に関わる核変換技術研究の計画を有す る世界唯一の大強度陽子加速器施設である。J-PARCにおいて、日本が主導的に 核変換研究を推進していくためには、J-PARC内あるいはJAEA / KEK内での活 動の他、国レベルでの理解、原子力学会など関連コミュニティーからの協力、ユー ザー研究者のより強固な支持などが必要不可欠である。これまでの J-PARC セン ター 核変換セクションの活動に加え、ユーザーと強く連携を図り、核変換実験施 設実現に向けた情報発信を行っていく。



図 10: 加速器駆動システムの開発ステップ



図 11: 核変換実験施設

7 産業利用

7.1 まえがき

物質の構造決定、製品等の形態観察、原子分子や物質の移動・拡散、あるいは化 学結合状態の解析は、産業界における研究開発における一般的ツールになってい る。これらの応用研究をさらに加速し、さらに産業の革新のための重要な知見を 与える強力なツールとして、中性子およびミュオンが期待されている。平成 20 年 度に中性子産業利用推進協議会が発足し活動を開始した。参加企業にはある程度 の経済的負担も要求した形での協議会であるにもかかわらず、わが国のもの造り にかかわるほとんどの分野;電器・電機 (6)、鉄鋼・金属 (9)、自動車・自動車部 品・精密機械 (10)、ゴム・プラスチック (14)、医薬・食品・化粧品 (6)、建設・エ ネルギー (4)、その他 (8)、から合計 57 社 (団体)の賛同と参加を得ることができ た。このことは、J-PARC およびその関連施設への産業界の期待の現れと判断さ れる。この協議会の参加企業の代表者の意見およびアンケート結果を中心にまと めたグランドデザインを報告する。

7.2 産業分野共通のグランドデザイン

大型施設が建設される前にラボX線装置での経験を持つ企業が多かった放射光施設 (SPring-8, PF)とは異なり、中性子関連実験は未経験に近く具体的利用計画を持たない企業が多い。したがって初期(~2015年)は産学官の連携による基礎研究により、応用に結びつく実例を示すことに主眼が置かれる。この期間では主に茨城県が整備する材料構造解析装置と生命物質構造解析装置を中心とした、現存および現在計画中の設備の活用から開始する。さらに、すでに活発に利用している企業からは、中性子ラジオグラフィの分解能向上、超低速ミュオンチャンネル整備など、世界をリードするための、より高度な施設開発に対する強い希望もある。また、タンパクの単結晶育成や重水置換などの試料調整設備と支援体制の整備と強化が望まれる。また、放射光施設に対するラボX線装置と同じような位置づけとなる、小型中性子源の早期の開発が望まれる.

これらの活動結果を踏まえた中期(2012~2020年)では、個々の企業が独自の ニーズに基づき施設を活用する段階となる。この段階では、分解能の向上や特殊 環境での測定など、施設側への具体的要求が想定され、企業担当者も装置整備に 積極的に参加することになる。この時期までには10⁹n/(s·cm²)の強度で第2ター ゲットも含め40本程度のビームラインで実験可能な、質・量ともに世界最高レベ ルの施設になるような計画的拡充を希望する。

さらに長期(2015~2030年)では、企業間での開発競争の中の一つのツールとして定着する。また「量子ビームプラットフォーム」が構築されれば、中性子利用者協議会は中性子関連施設に特化した利用ではなく、放射光施設や大型核磁気

共鳴施設なども含めた横断的利用のための組織に統合されるべきであろう。また、 各県あるいは各企業単位で利用可能な小型加速器や、レーザーを利用した小型中 性子源を開発し、各企業単位での開発・生産ツール、あるいは大型施設利用のた めの予備試験機器として整備されることも期待されている。

7.3 産業分野別

7.3.1 製薬·食品工業

SPring-8 と中性子解析を組み合わせたタンパクの構造解析が製薬業界にとって 不可欠となると推測され、種々の解析装置の複合利用を必要とする他の分野と異 なり専ら生体物質構造解析装置の利用が中心であるので、産業界専用のビームラ イン設置検討具体化可能性が高い分野である。競合する世界の先進メーカーがす でに盛んに利用を始めている現状と、その有効性についての認識を共有するため、 茨城県生命物質構造解析装置などを用いた産学官の連携による基礎研究を推進し、 中性子産業利用ユーザーの拡大を計る。それと同時に、中性子利用基盤技術(試 料調製技術、結晶大型化技術)の開発を最優先で推進する。その活動を踏まえ、生 物分子の機序に立脚した疾病の克服、さらに新興感染症の克服に迅速に対抗する ことができる精密な生物分子機械(治療用ナノマシン、治療用ウイルス)の創製 のための本格利用へ展開する。そのためには、大型のタンパク質複合体の構造解 析に適合したタンパク質専用中性子回折計の整備が不可欠である。

7.3.2 鉄鋼・金属材料・機械(自動車部品)

この分野はすでに JRR-3 などを利用した応用研究の実績がある。したがって、 J-PARC の本格稼動に伴い、定常原子炉も含めた効率的利用促進への発展を期待 する。高比強度(目標 1800MPa 級)の鋼板開発や、機械部材の信頼性確保のため の解析ツールとしての活用拡大を期待している。J-PARC の高強度・高品質なパ ルス中性子源を活かした装置開発・改良による装置性能向上、製造技術に直接反 映できるその場観察環境の整備が望まれる。

7.3.3 ゴム・プラスティック・化学素材

ソフトマターと呼ばれるこの分野では、原子・分子構造およびそれらの会合体、 集合体、さらには炭素繊維などとの複合材など 0.1nm スケールから数 cm スケー ルの寸法スケールでの階層構造の解析と制御が重要課題である。中性子やミュオ ン解析技術の高度化と同時に、放射光や NMR などとの融合による多角的な解析 が極めて有効であり、それをコーディネートする横断的組織の構築が必要である。

7.3.4 磁石・磁性・記録材料

磁石材料は電器・電機および自動車産業にとって最重要課題である。現有材料 の持つ保持力の2~4倍の性能,ならびに,稀少金属の使用を抑えつつ高性能を 有する磁石の実現のための技術的ブレークスルーが待ち望まれている。そのため には研究を基礎から長期的に積み上げる必要がある。また、磁気記録材料では国 際競争力を確保し,更に,リードするための材料、プロセス開発が不可欠であり, 中性子とミュオンは非常に有効な解析手段である。

7.3.5 蓄電デバイス

電池およびキャパシタなどの蓄電デバイスは電器・自動車・エネルギー関連産 業にとって、重要デバイスであり、特に近年は自動車用用途を中心にその高容量、 高パワー密度、高耐久性を目指した開発が加速している。水素原子の構造解析に 強い中性子と、水素トレーサーであるミュオンを活用して、現在の電池システム の材料の構造、界面構造、イオン拡散挙動を解析する手法の確立が不可欠である。 さらに、高耐久性実現のためには、高低温や電場印加での測定など、実使用状況 に近い測定環境の整備を希望する。

7.3.6 燃料電池

燃料電池は、自動車およびエネルギー産業の次世代の基盤技術として重要であ るばかりではなく、燃料電池用材料に要求される特性実現のための課題は、プラ スチックなどのソフトマターなどの材料基盤研究の課題にフィードバックされ両 者が協調・発展している。また、燃料である水素の製造、輸送および貯蔵技術で は金属材料、有機化学素材をはじめとして、プラスチック複合材料などの技術を 集大成したシステム開発が必要となっている。燃料電池システムはこれまでに有 用性の実証段階がほぼ完了し、今後はコストと耐久性を意識した商品開発の段階 となっている。水素あるいは水を含む系の解析には特に中性子やミュオンが適し ており、J-PARC 稼動を契機として、現有のラジオグラフィ、全散乱、回折、反射 率、小角散乱、準・非弾性散乱、パルスミュオンの整備と活用、さらにラジオグラ フィの空間分解能向上や超低速ミュオン施設などを早急に推進する必要がある

7.4 利用拡大に向けて

中性子とミュオンが応用研究・製品開発のための強力なツールであることは、こ れまでの結果で十分に明らかにされている。世界最高の強度と性能を持つ J-PARC 稼動を契機として、これから利用を開始する企業にその有用性の具体例を示し、広 く認知して貰う活動が急がれる。さらに装置の高度化を提言すると同時に、材料 の合成・成型・使用環境でのその場観察を可能とする環境整備と、SPring-8などの 関連施設との有機的ネットワーク構築が産業界ユーザーの役割と考える。J-PARC などの各装置群を有効に使いこなすためには、実験を支援する人材の育成充実・ 実験者の宿泊設備の整備等を着実に進めていただきたい。特に自動測定系の整備、 宿泊施設からのデータ監視と実験パラメータのリモート制御、さらに試料交換や トラブル対策のために J-PARC へ徒歩 10 分以内 に到着できる利便性の高い宿泊 施設建設・増強の必要性も付記したい。

産業分	野	製業·食品	鉄鋼・金属・機械(自動車部品)	ゴム・プラスチック	磁石·記録材料	蓄電デバイス	燃料電池
各産業分野での	~ 2015	ユーザー拡大	1300MPa級鋼板	高機能材料	46 磁率+ 30%・記録密度300 Cp/in	70Wh/kg	5万円/kW
開発目標	~ 2020	生物分子利用疾病克服	1500MPa級鋼板	環境調和材料	III/90009a 器 4 100% ·	100Wh/kg	1万円/kW
	~ 2030	治療用ナ/マシン・ウィルス開発	1800MPa級鋼板	非石油系材料	保磁率+200%,記録密度3Tb/in ²	150Wh/kg	5千円/kW
解析手法・ビームラ	シイン						
茨城県生命BL	~ 2015	分子量;20-50 kD·分解能0.25nm		単結晶:0.1mm ³ ·分解能:0.1nm		生体酸化還元酵素機	構解明
タンパク構造解析	~ 2020	分子量;50-80 kD·分解能0.20nm		単結晶:0.03mm ³ ·分解能:0.1nm		生体酸化還元酵素機	構模倣電極
	~ 2030	分子量;80-100 kD·分解能0.15nm		単結晶:0.001mm ³ ·分解能:0.1nm		生体膜構模倣	電解質
茨城県材料BL	~ 2015	1時間/1サンプル	集合組織解析:5分以内	粉末:1h/試料		電極活物質粉末	回折
粉末回折	~ 2020	10分/サンプル, /D化不要技術	集合組織解析:1分以内	粉末:0.5h/試料		劣化モデル構造のin-	situ測定
	~ 2030	ビームの指向性の更なる改善	集合組織形成その場測定	粉末:0.1h/試料		パッケージの充放電In	1-situ測定
小角散乱	~ 2015		ナノ析出物の定量化	小角・粉末の同時測定		電解質層分離構	造解析
	~ 2020		構造解析とサイズ分布	の有機的連携		劣化モデル構造のin-	situ測定
	~ 2030		プロセス中その場測定	放射光・NMRとの連携		パッケージの充放電In	1-situ測定
反射率				相分離·接着界面解析		電極/電解質界面構	造解析
偏極中性子	~ 2015				深さ分解能;0.2nm		
	~ 2020				面内分解能;2nm		
磁気散乱	~ 2015				熱処理反応のin-situ解析	電極構造変化解析	触媒活性解析
	~ 2020				特殊雰囲気in-situ計測		
	~ 2030						
ミューオン	~ 2015				超低速ミュオン(多層膜界面解析)	超低速ミュオン(多層)	莫界面解析)
	~ 2020					パレスミュオン	ノ整備
準弾性散乱		タンパク内水・イオン拡散解析		溶媒·溶質拡散解析		電解質・イオン・の拡散	炎解 析
非弹性散乱	~ 2015			非弾性・小角・粉末			
	~ 2020			の有機的連携			
	~ 2030			放射光・NMRとの連携			
残留応力	~ 2015		応力測定精度±30MPa				
	~ 2020		ゲージ体積0.05mm³				
	~ 2030		応力測定精度±10MPa				
ラジオグラフ	~ 2015		空間分解能1μm			空間分解能1	μ m
	~ 2020					空間分解能0.	$5 \mu \text{ m}$
	~ 2030					時間分解能1)m秒

図 12: 産業分野別のグランドデザイン

8 J-PARC加速器の可能性と将来計画

8.1 はじめに

J-PARC 加速器は従来の陽子加速器に比較して飛躍的に大強度のビームを実現 することを目的とした施設である。例えば、KEK-PSと比較すれば、エネルギー は12 GeV から30 GeV (第一期目標)と2.5 倍へ、ビーム強度は5 kW から1 MW 級へと200 倍の飛躍である。このような大きな飛躍は既存の技術のみを集積して 実現することは困難で、ビーム光学設計や加速器機器について新たな挑戦(チャ レンジ)を伴うものである。全体設計に当たっては、チャレンジを個々のデバイ スにまでブレークダウンしたとき、それに伴うリスクを徹底的に分析し、かつそ れを特定の部位に偏在させないで、バランスをとることでリスクをマネジできる レベルまで軽減することが重要である。

J-PARC 加速器はチャレンジに伴う種々の課題を内包しながらも、これまで計 画したスケジュールを損なうことなくビーム試験を行ってきている。そこでは第 一期の設計性能を実現していくことを大きな目標としているが、建設をほぼ終了 した今、これからは利用系へビームを供給しつつ、多くの課題を解決しながらこ の目標を果たしていかねばならない。本章では第一期に目標とする性能を整理し、 今まで得られたビーム試験やシミュレーションの結果をもとに、今後克服すべき 主な技術的課題を例示する。次に、J-PARC 加速器の目標性能のさらなる増強可 能性を紹介する。これらの可能性の実現のために、様々な課題を、どのような優 先順位を設けて開発していくかは、大強度陽子加速器を用いた研究の将来の動向 によるところもある。そして最後に長期的展望についても述べる。加速器開発の 中には、数年から10年単位の期間と多くの加速器科学技術者の育成、また多額の 費用が必要なものがあることから、計画実現のためには、今後とも加速器担当者 と利用者との不断の密接な連携が極めて重要である。

8.2 これまでのビーム試験結果と第一期性能の実現

8.2.1 加速器の性能

J-PARC 加速器はリニアック、速い繰り返しの3 GeV シンクロトロン (3 GeV Rapid-Cycling Synchrotron, RCS)、主リングシンクロトロン (Main-Ring Synchrotron, MR) の3段階の加速器からなっている。上流部から順次ビーム運転を開 始し、現在は RCS 出力ビームを MLF 利用実験へ供給しながら MR のコミッショ ニングを行っている。ここで先ず、「ビーム力学性能」、「加速器性能」、「加速器安 定性」、「加速器信頼性」を定義しておく。「ビーム力学性能」とは、すべての加速 器機器が設計通りの性能で稼動しているときに実現可能なビーム電流・出力を言 う。それは空間電荷効果等ビーム不安定性など粒子集団効果によって制限される ものである。「加速器性能」は加速器機器の電磁気的・機械的・力学的性能をいう。 「安定性」および「信頼性」はそれぞれ各加速器機器のパラメーターの精度および 稼働率をいう。これらは相互に密接に関係しているので、総合的な検討、判断が必 要であることは言を待たない。特に、我々が目指すところは、年間 5000 時間にお よぶ利用実験に安定にビームを供給することであって、「ビーム力学性能」は「加 速器性能」、「安定性」および「信頼性」を満たして初めて実現することを認識しな がら、バランスのとれた方針を策定していかなければならない。

リニアック、RCSのビーム力学性能について述べる。最近、25 Hz で運転した 場合に出力 300 kW に相当するビームを1ショット加速することに成功したが、そ の意義は極めて大きい。現状の、エネルギーが 180 MeV の入射でビーム出力 300 kW を達成する時の空間電荷力は、入射エネルギーを 400 MeV に増強したとき、 ビーム出力1 MW を達成する場合の空間電荷力と計算上同じである。空間電荷力 はエネルギーの低い入射時に最も大きいし、ビーム入射過程は複雑であることか ら、一般に入射時に最もビームロスが大きくなる。従って入射時のロスについて 理解し、制御することは、第一期設計性能の1 MW 出力達成にとって必須なので ある。

陽子加速器の場合、ビーム出力を大きくしようとするとき、ビームロスはコリ メーター部に局在化させることが必要条件となっている。RCSの入射について述 べたが、次に加速時のビームロスについても検討が必要である。入射エネルギー が180 MeV と400 MeV の場合では、加速時の空間電荷力は異なることに注意を要 する。またこれまでのビームスタディの結果から、加速時にも制御可能な6極電磁 石電源の早期の追加が必要とされている。現在設置してある RCS のコリメーター において許容されるビームロスは4 kW (制御可能なビームロス)である。一方、 コリメータ以外でのビームロス(制御不能なビームロス)は放射化場での保守作 業のことを考慮し、300W(1W/m)以下を条件としているが、これは相当に厳し い許容値である。また RCS ビーム出射部での許容ロスは 80W と小さく、RCS は フルアパーチャを有するといえども今後十分注意を持って臨む必要がある。RCS のビームスタディの日が未だ浅い現段階の知見では生じているビームロスが空間 電荷効果に起因するビーム不安定性によるのか、ビーム軌道調整が未だ不十分で あるためか、あるいは何らかの原因でアパーチャーが十分でないためか、その見 極めは今後の課題である。ビーム出力目標は、180 MeV の入射エネルギーで 300 kW、400 MeV 入射では1 MW であるが、今後ビーム運転の経験を積み、また徹 底的なシミュレーションも行い、かつ放射化場における保守作業の技術向上とあ わせて、その達成に向けた努力を行っていく。

MR については、上記のようにビーム電流・出力について、現状のビーム試験実 績をもとに議論できる段階には未だないが、空間電荷効果の目安であるラスレッ トチューンシフト(Laslett により公式化された空間電荷効果によるチューンシフ ト、ラスレットパラメター)の値では、RCS とほぼ同程度の設計である。ただし RCS は 0.5ms の間入射した後、直ちに加速が始まるのと比較すると、MR は RCS の4サイクル分を入射するため、RCS の 200 倍以上の 120ms もの入射時間があり、 この間入射エネルギーにとどまらねばならない。シミュレーションによれば、こ の間のビームロスは大きく、厳しい条件となっていることを考慮しなければならな い。さらにもう一点、MRが RCS と大きく異なるのは、出射機器のアパーチャー の設計思想である。RCS がフルアパーチャーであるのに対し、MR は 50 GeV ま での加速による断熱減衰を前提として、それに見合った出射アパーチャーになっ ていることである。シミュレーションによれば、MR の出射アパーチャーは、30 GeV のビームエネルギーで出力 100 kW 以上にしようとする段階で既に相当の検 討と対策が必要であることがわかっており、今後 MR の出射機器の改造を視野に 入れて取り組んでいく。

MRのビームコリメーターは、入射路とリングの2箇所に設置され、そのキャパ シティは両者とも450Wと小さい。最近のMRのビームシミュレーションによる と、たとえばRCSの出力が600 kW相当(MRに入射する最大ビーム強度の60%) のビームをMRで加速する場合には、加速の途中までは断熱減衰よりも空間電荷 効果によるエミッタンス増大が顕著で、リングコリメータの許容容量450Wを大き く超えることが示された。同様に、入射路コリメータも同じ強度(60%)では、そ のコリメータ容量を大幅に増強する必要があることがわかってきた。ビームスタ ディを行いつつ、出力増強に応じたハードウエアの増強を図っていく必要がある。

8.2.2 新たに導入した技術

目標とする性能を達成するために J-PARC 加速器に新たに導入したアイディア の一例として、遷移エネルギーの克服をあげる。RCS、MR ともにその加速途中 で遷移エネルギーを通過しないビーム光学設計を採用している。そのため、加速 途中での顕著なビーム損失は観測されなかった。RCSでは1%以下であった。MR においては未だ詳細なことを言える段階にはないが、30 GeV までのビーム加速試 験は順調であった。KEK-PS の場合の、遷移エネルギーを乗り越えるときの苦し い経験からすると、これは極めて大きな進展と言える。

新たなアイディアの第二の例として、RCS、MRの加速空洞をあげる。J-PARC は加速空洞に、古くから陽子シンクロトロンに一般的に使用されていたフェライ トではなく、1990年ころに実用化された磁性合金を採用した。このことにより非 常に低いQ値を実現することに成功したことも特筆すべきことである。そのため、 従来のように加速に伴って加速空洞の共振点を変化させる必要がなくなり、励振周 波数を制御するだけで十分となった。その結果、加速途中の高周波制御が容易に なったのであるが、これらは将来の大強度化に対して非常に有利な点である。し かし一方では、新たなアイディアの採用に伴って、従来は考える必要の無かった リスクも持ち込んでいることも認識しなければならない。次節で述べるように磁 性合金の耐久性の実績については現在のところ最長でも 3000時間未満であり、長 時間使用したものが急激な劣化を起こす場合があることも分かった。年間 5000時 間以上の運転という要求性能を満たすためには今後のさらなる開発を待たねばな らない。

8.2.3 加速器安定性·信頼性

リニアック、RCSの当面の課題は、上記の局所的放射化への対応を別にすれば、 高い稼働率で提供できるビーム出力がどの程度にできるかということである。こ れまでの実績は1ショットで300 kW 相当および200 kW で70 秒、及び、100 kW で1時間という短時間なものでしかなく、潜在的能力は示したものの、年間数千時 間という要求がどこまで満たせるか、システムの構成要素のほとんどを検討の対 象にしていかねばならない。その中でも最大かつ焦眉の問題は、3 MeV RFQ リニ アックとリング RF 加速空洞の磁性合金コアである。RFQ 問題にはイオン源を含 む入射系の真空設計を大幅に見直すことも含まれる。RFQ 本体についても現在、 性能の維持に取り組むとともに状況の理解に努めてきた。その結果材料選択、切 削技術、真空設計の大幅な改善が必要で、要素技術の確認試験をベースにバック アップ器の設計、製造とその早急な導入を前提に作業を進めている。

もう一つの磁性合金の課題については、現状のコアの信頼性向上のための開発 を続行しつつ、並行して現行方式に拘らず、自己補修作用を持つコアを目指した 新たなシステムの開発なども行っている。その他にも、RCSにおけるバンプ電磁 石、ビーム取り出しキッカーといったパルス機器の信頼性、荷電変換フォイルの 長寿命化などについても今後とも改善の努力を継続していかねばならない。

MR については、主電磁石電源系の安定性に大きな課題を抱えている。昨年5 月のビーム試験以降の努力により、リップルが10⁻² 台から10⁻⁴ 台に改善され、そ の結果 30 GeV ビーム加速、取り出し試験を達成した。しかし、今後100 kW 以上 のビーム出力を目指すに当たっては、より精密な磁場のトラッキングやリップル のさらなる低減が必要である。特に、遅い取り出しビームを安定に供給するため にはリップルに関して一桁以上、すなわち ppm からサブ ppm の安定性が必要で ある。

全般的にビームおよび機器の運転経験を踏まえて日々機器の特性を理解し、そ れに基づき信頼性に問題のある機器があれば、それを順次改善する努力の集積の上 に始めて安定な運転が徐々に実現されていくものであることを忘れてはならない。

MR については、上記の電磁石以外に、入出射機器、なかんずくパルス機器に 対し、立ち上り時間の改善やビーム口径の拡大、機械的性能の改善が必要である。 また、より精密な磁場のトラッキング、補正多重極電磁石の採用の必要性等も予 想される。これらは、今後の運転経験、ビーム実験結果を踏まえ、優先順位を付 けて段階的に整備していくのが妥当である。

8.2.4 性能の改善

RCS および MR の第一期性能を達成するためには、これまでに述べたように、 現機器のうち、RFQ も含む入射系などをより信頼性を高めるよう順次改善しなが ら、さらに現在分かっている範囲でも最低限以下の増強が前提となる。

- 1. リニアックのビーム・エネルギーを段階的に 400 MeV に増強するとともに、 RCS への入射バンプ電磁石や電源をそれに合わせて段階的に 400 MeV 対応 に増強すること。
- 2. ピーク電流 50 mA の負水素イオン源、RFQ およびチョッパーを含むビーム 輸送系の開発(現在はピーク電流 30 mA)。
- 3. MRの周期を現状の6秒から3.5秒とし、バンチ数も6バンチから8バンチ に回復すること。
- 4. 全般的に大電力電源の性能改善をはかること。微小電力で駆動する高精度制 御系の大電力部分との隔離が十分でない。
- 5. 全般的にビーム診断装置の性能改善をはかること。各種のビーム診断装置の 性能が最終的なビーム性能を規定する、といっても過言でないことは、KEKB の例からも言える。そのためにはノイズ低減、ノイズ源隔離、診断装置自体 の改善等のための絶え間ざる努力も重要である。

これらの事項は予算的にも技術的にも数年程度以上の建設または開発期間が必 要であり、しかも利用実験に対するビーム供給と並行して進める必要がある。こ こで、重要なことはハードウエアとしても確実なものを作り上げるだけではなく、 各加速装置毎の大強度ビームの振る舞いを明確に把握することである。既に述べ たことではあるが、実践的課題としてアパーチャーとコリメーターシナリオを検 討すると共に、放射化した機器のメインテナンス手法を包括的に解決する方策を 確立しなければならない。

8.3 MR 增強可能性

MRの第一期計画では、パターン周期を3.5秒、ビームエネルギー40 GeV、ビーム出力0.6 MWを当初想定していたが、現有機器の性能では、ビームエネルギーは30 GeV に固定したいと考える。なぜならばビーム電力を増強する方法としてビームエネルギーを30 GeV 以上に上げることは電磁石を飽和領域で使用することになるため、安定運転、電力使用効率を犠牲にすることになるからである。エネルギーを下げれば、当然その分ビーム電力は低下するのであるが、速い取り出し運転の場合、加速後に直ちにビームを取り出し、磁場を下げる運転を行い、かつ電

源の制御システムに手を加えることにより、繰り返しを 0.5 Hz 程度まで速めるこ とが原理的には可能になる。ただし周期を短くするためには、電磁石電源以外に も全機器も対応可能なようにしなければならないことは当然である。また RCS の 加速周波数を1/2にし、かつ RCS から MR への入射回数を2倍にすることにより MRのビーム電力を増強することも可能となる。これらを全て実現することによ り、初期の設計目標の0.75 MWを超えるビーム電力を達成する可能性が生まれて くる。もちろん MR の電流を増やそうとすればビーム損失も増加する可能性が増 えるわけで、ビーム出力の増加比でビーム損失を減らす手立てが必要である。さ らには、MRに8バンチ入射するためのRCSのサイクル数は4サイクルから8サ イクルへと入射時間が延びるので、その分のビーム損失の増加分も制御せねばな らない。ここでは MR におけるバンチング・ファクターが重要な調整ノブとなる ので、ビーム長を長くして空間電荷効果を下げることを追求しなければならない。 すでに第一期の目標自体、チャレンジングなものであるので、ビーム損失をさら に大幅に減らすためには、極めて大きな努力が必要である。いずれにせよ、実際 の運転における実現可能なビーム出力は、メインテナンスの観点から許容しうる 残留放射線レベルで決まることを忘れてはならない。

一方、このような運転は、MLF に影響を与える。平均的には RCS から MR へ約 5%のビームが入射されるはずが、約 16%となり、その分、MLF に行く陽子ビーム が減少する。さらに現在の中性子源標的は、約 0.3 Hz で 200ms の間(40ms × 5 = 200 ms の MR への入射時間)、3 GeV 陽子ビームの標的への入射が停止すること を前提に設計されている。この停止期間が 9/5 倍となることに標的が対応できる かも検討しなければならない。また RCS のハーモニック数を1 にしようとした場 合は、ミュオン二次ビームラインのビームパルス幅を短くする方策を同時に考え ねばならない。

いずれにしても、前節に述べた多くの課題を克服しつつ、その運転経験を踏ま え、どのパスが最も有効か見極めつつ開発を進める必要がある。400 MeV リニアッ クが実現されたとしても、その後調整運転と機器改善のフィードバックループを 繰り返す数年以上をかけた継続的な運転が不可欠であることは言を待たない。

8.4 更なる長期的将来への備え

ADS に対しては、冷却水系やイオン源電源を第一期の 25 Hz 対応から 50 Hz 対応 応に増強すれば、加速管や大電力高周波電源系など、加速器本体は 50 Hz 対応と なっているので、RCSへのビームを供給しつつ、ADSの実験を行うことが出来る。 ここで、リニアックトンネルは、400 MeVの下流部に、分岐部があり、そこでの シールドは撤去が可能なコンクリートブロックになっている。したがって、ADS を建設する際に、その建設終了後にブロックを取り払うことにより、建設期間中 のビーム運転への影響を軽減できる。また、超冷中性子源に対しては、400 MeV もしくは 600 MeV からのビーム取り出しが可能である。ただし、その際には ADS との両立運転に関しての検討が必要である。

さらには、4.10で述べられているような、中性子第2ターゲットステーション やそれに伴う中性子強度の増強には、以下の方策が考えられる。ここで、ADS へ の分岐と同様の考え方で、運転スケジュールへのインパクトを低減しながらリニ アックのエネルギーを第二期計画の 600 MeV よりさらに高い 1 GeV 以上まで増強 できる。そこで、RCSの入射技術が開発され、負水素イオン源のピーク電流がさ らに改善されていくならば、第2ターゲットステーション用に新しく第二の RCS を建設し、それにこの GeV 級のリニアックを組み合わせることにより、空間電荷 効果を考慮しても、数 MW のビーム出力を達成することも視野に入ってくる(こ の場合、ADSとの共存のためには、リニアックのビーム繰り返し75 Hzへの増強 が必要となる。加速管、大電力高周波電源系、冷却水系の増強とともに、ビーム電 流増強のための高周波電力増強やリニアック全体にわたる真空度向上も必要であ る。こうした増強は既存建家が50 Hz までの運転を前提に設計していることから、 機器配置や受電容量、許容される運転停止期間など、影響が広範囲に渡ることから 十分な検討が必要である)。またリニアック高エネルギー部の RF 周波数 972 MHz は、低エネルギー部の324 MHzの奇数倍の3倍に選んであることから、原理的に は負水素イオンと陽子の同時加速も可能である。したがって、ms 程度の長パルス 中性子源が想定される場合には、リニアックで陽子を加速することも考えられる。

以上、我々は大きなチャレンジを達成するために、多くの課題を抱えていること を自覚しながら、これに果敢に取り組み、J-PARC加速器が果たすべき使命を達成 する覚悟である。そうして日々研鑽を積むことにより将来を切り開いていくべき であることを肝に銘じている。そのためには JAEA/KEK 両機関に所属する担当 者は一丸となって組織的に働くこと、また全ての利用者コミュニティとの密接な 情報交換、意見交換も行っていくことが重要である。全ての努力が組織的、かつ合 理的になされるよう JAEA/KEK 両機関には全面的なサポートをお願いしたい。

9 J-PARC 利用者協議会が描く J-PARC における研 究の指針と展望

以上の各分野の J-PARC に対する展望を踏まえ、J-PARC 全体として、今後5 年、10年、及び10年後以降どのような方針で進めていくべきか、どのような発展 が期待されるかをまとめる。

9.1 初期:今後5年間

まず初めは加速器を設計通りの性能で安定して運転できるようにし、初期の実 験成果を出していくことが重要である。

- まず、加速器を長期間安定に動かすために解決すべき問題点を明らかにし、
 それらを解決していくことが緊急の課題である。
- 次に、必要なバックアップ体制を築いて対策を講じ、加速器の強度と性能を 設計された値まで早期に引き上げて行くべきである。
- また、初期の実験を遂行して結果を出せるように、必要な設備を整備すべきである。ただし、予算的にも余裕のない時期であるため、他で使える資源等を最大限利用するなどの自助努力も利用者には求められる。
- J-PARCの大強度陽子ビームを用いて初めて可能となる、新たな機軸となる ビームラインとして、超低速ミュオンビームを早期に整備すべきである。こ のビームラインの建設によって表面・界面ナノサイエンスやミュオン素粒子 物理の突破口となる新しい研究領域の開拓が期待される。
- 素粒子の分野においては、J-PARCを規定強度で運転することが必須条件となる。これによりニュートリノ振動のパラメータθ₁₃を世界最高感度(約0.02)まで探索し、電子ニュートリノ出現事象の発見を目指す。また中性K中間子の稀崩壊実験では、標準理論の予測の2倍以上の崩壊分岐比を生む新しい物理を探る。
- ハドロン実験施設での原子核・素粒子物理に関する当初の実験を速やかに遂行するために、K1.1 ラインや高運動量ラインなどの必要な二次ビームラインを早急に整備する。また、ハドロン実験施設の拡張のための準備を始める。
- ・中性子・ミュオンの施設が世界を索引する科学を創出し、産業利用に貢献するには、装置のグランドデザイン²⁴を考慮して必要なビームラインと実験装

²⁴日本中性子科学会 第4期大型施設共用問題特別委員会「J-PARC グランドデザイン策定に向けて」(2008)

置を継続的に建設するとともに、装置周りの設備、試料環境(高圧、高磁場、 低温、重水素化試料準備室等)を早急かつ恒常的な整備しアップグレードす ることが必要である。

 産業利用の面では、産学官の連携による基礎研究と応用研究を平行して推進し、中性子・ミュオンを産業分野に応用する要素技術を開発し、実製品への 適応事例を示す。そのためには、上記の設備の整備に加え、実験支援体制、 および研修会等の広報・教育環境の整備と充実が必要である。

また、小型中性子源の早期開発が望まれる。これは、放射光施設に対するラ ボ X 線装置と同じような位置づけとなる。

核変換物理実験施設の設計・許認可申請を終え、建設に着手する。

9.2 中期:今後10年間

安定して大強度のビームを出せるようになれば、次は施設全体を充実させ、大 強度を生かした成果を大量に出していく段階となる。ただし、以下の事柄は予算 的に可能ならば5年を待たずに始めてもよい。

- ビームラインを増設し、より多くの利用者が同時に利用できるようにする 必要がある。具体的には、ハドロン実験施設の拡張と第2標的とそこからの ビームラインの設置、中性子・ミュオンの施設では中性子のビームラインと ポートの分岐、高速ミュオンビームラインの建設などがある。なお、これら の拡張や建設に際しては、初期の実験での経験を踏まえつつ、既にある提案 や将来の提案にも柔軟に対応できるように考慮する必要がある。
- 素粒子実験においては、ニュートリノビームの大強度化と反ニュートリノによる初期の CP 対称性の破れの測定、K 中間子稀崩壊の精密測定、μ→ e 変換の探索やμ粒子のg-2測定、中性子の電気双極子測定などの基礎物理実験などの計画がある。これらの計画については、実験の結果や開発研究の進展を評価して、適宜実行する。
- ・中性子・ミュオンを応用開発の一般的な解析ツールとして定着させ、次のス テップに向けた実験設備・施設の充実と性能の向上を進める。また具体的 なニーズを産業界から提言し、装置開発者との共同研究・開発を積極的に進 める。
- 核変換物理実験施設を完成し、これを用いた核特性実験に入る。これと並行して、リニアックの核変換専用ラインに超伝導加速部を増設し陽子エネルギーを400MeVから600MeV(200kW)へ増強するとともに、増強した陽子ビームを投入するADSターゲット試験施設を着工する。

9.3 長期:10年後以降

施設全体が充実し、成果を出し始めた後は、さらにビームの強度を増大して J-PARC での科学を次の段階に発展させていく。

- また、大強度のニュートリノビーム、パルス状ビーム、偏極ビーム、重イオンビームの加速などの種々の要望も出て来るため、それらによって得られる成果を見極めて必要な加速運転を行う必要がある。
- 素粒子分野では、陽子崩壊や宇宙素粒子実験も含めたニュートリノ長基線実験用の大型測定器の建設、K中間子、ミューオン、中性子実験の更なる高感度化を行う。
- 原子核実験分野では、遅い取り出しビームのエネルギーを 50GeV に増強し、 K⁻や反陽子などの2次ビーム強度を向上させるとともに、より高運動量の 1次ビームによるハドロン実験を可能にする。また、偏極ビームや重イオン ビームを加速して、これらを用いた原子核・ハドロン実験も進める。新たな 実験の必要に応じて、ハドロン実験施設のさらなる拡充や設備の増強を行う。
- ・中性子・ミュオン実験施設では、1GeVリニアックとの組み合わせによる数 MWのビーム出力を実現し、第2の中性子標的とミュオン用標的の建設を開始する。
- J-PARC 中性子・ミュオンのより有効的な学術利用、産業利用を目指し、放射光X線も含めた解析・観察の有機的連携のためのプラットフォームを構築する。企業あるいは開発組合も産業利用の専用装置の整備を具体的に検討し、プラットフォームの構築に主導的役割を果たすべきである。
- 完成した ADS ターゲット試験施設及び核変換物理実験施設ともに実験を進め、ADS の工学的成立性を実証するとともに、ADS 実用化に向けた次の開発段階である実験炉級 ADS の設計に必要なデータベースの整備を進める。
- またこれらの施設の実現のためには、用地の拡大も視野に入れて計画する必要がある。

9.4 終わりに

以上で示した指針や展望は、あくまで2009年現在の見通しに基づくもとである。 加速器の性能向上度、新たな実験的発見、新たなビームラインの技術などにより、 これらの指針や展望は時と共に変わっていくであろう。しかしいずれの時にも、大 きな指針は利用者の要望に基づいて決められ、個々の遂行すべき実験は第3者に より構成された実験審議委員会などで公正な厳しい審査を経て選んでいくべきで ある。

これらの指針や展望の実現には、サイエンス主導の運営組織の確立と、他の施設との緊密な連携体制、さらに世界との連携、特に今後科学・技術の爆発的な進展が予想される東アジア地区との協力が必要である。またこれらのプロジェクトの推進を通じて、進むべき道を自ら切り開く若い研究者を数多く育てていくという使命を、J-PARC は負っている。

J-PARCは、素粒子という基礎科学から中性子の産業利用さらには核変換と、幅 広い分野が共同利用する世界にも稀に見る施設である。こうした異なる分野が交 流することによって、さらに新たな科学が生まれ、発展することを願う。

10 執筆者

• J-PARC 利用者協議会委員

氏名	所属	専門
中家 剛	京都大学	高エネルギー物理学
山中 卓	大阪大学	高エネルギー物理学
駒宮 幸男	東京大学	高エネルギー物理学
西川 公一郎	KEK	高エネルギー物理学
田村 裕和	東北大学	原子核
永江 知文	京都大学	原子核
酒井 英行	東京大学	原子核
齋藤 直人	KEK	原子核
仲澤 和馬	岐阜大学	ハドロン利用者協議会
金谷 利治	京都大学	中性子
佐藤 衛	横浜市立大学	中性子
山田 和芳	東北大学	中性子
吉沢 英樹	東京大学	中性子
藤井 保彦	JAEA	中性子
西田 信彦	東京工業大学	ミュオン
鳥養 映子	山梨大学	ミュオン
西山 樟生	KEK	ミュオン
福永 俊晴	京都大学	MLF 利用者協議会
岩崎 智彦	東北大学	核変換
鬼柳 善明	北海道大学	核変換
福嶋 喜章	豊田中央研究所	産業界
西島 和三	持田製薬	産業界
亀井 信一	三菱総研	産業界
林眞琴	茨城県	

• J-PARC 加速器

氏名	所属	専門
山崎 良成	KEK	加速器
安東 愛之輔	KEK	加速器
吉岡 正和	KEK	加速器
小林 仁	KEK	加速器
長谷川 和男	JAEA	加速器
金正 倫計	JAEA	加速器
小関 忠	KEK	加速器