

日本中性子科学会
ロードマップ検討ワーキンググループ (試験研究炉)
第三次答申

— 「もんじゅサイトに設置する新たな試験研究炉」についての意見集約—

日本中性子科学会 ロードマップ検討ワーキンググループ (試験研究炉)

2023年3月30日



本文書の位置付け

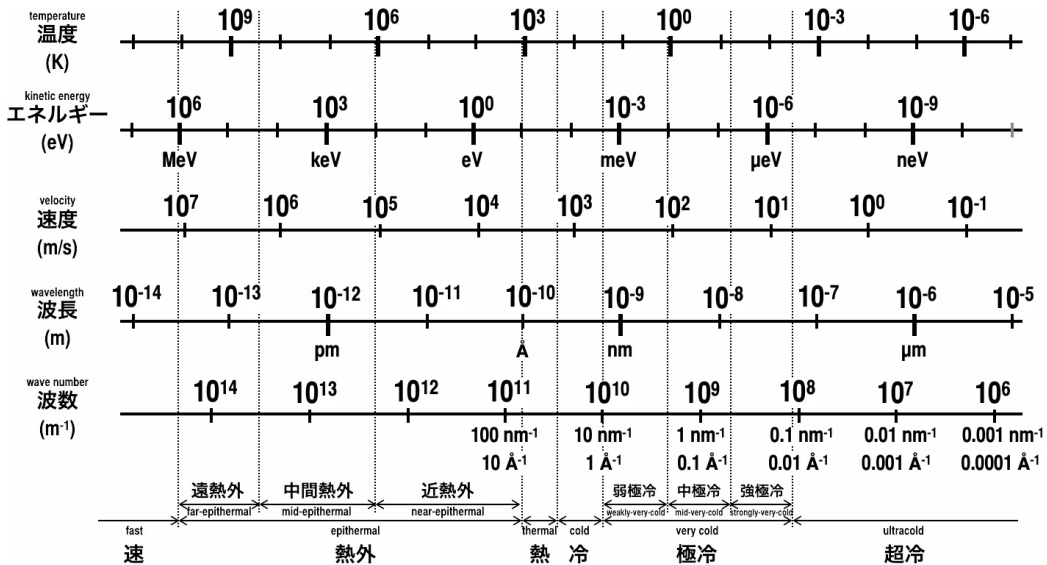
日本中性子科学会 ロードマップ検討ワーキンググループ (試験研究炉) は、日本中性子科学会において、学会長のもとに編成されたワーキンググループであり、中長期的な中性子科学ロードマップにおける「もんじゅサイトに設置する新たな試験研究炉」の位置付けに対する提言の取りまとめを行う。本文書は本ワーキンググループから中性子科学会長への第三次答申であり、新試験研究炉における中性子利用についての提言を取りまとめたものである。

日本中性子科学会 ロードマップ検討ワーキンググループ (試験研究炉) メンバー表

第1期 (2020/11/11-2021/03/31)		第2期前半 (2021/06/04-2022/03/31)		第2期後半 (2021/04/15-2023/03/31)	
清水裕彦 加倉井和久 鬼柳善明 山形豊 有馬孝尚 藤田全基 川端祐司 杉山正明 山室修 武田全康 大友季哉 佐藤卓 鈴木淳市 古坂道弘 広田克也	委員長 中性子科学会長 施設連携 WG 長 基礎基盤部会長 中性子科学推進委員長 ロードマップ検討特別委員長 京大複合研 京大複合研 京大複合研 東大物性研 JAEA KEK, J-PARC MLF 東北大多元研 CROSS 産総研・KEK secretary	清水裕彦 加倉井和久 鬼柳善明 山形豊 有馬孝尚 川端祐司 杉山正明 山室修 脇本秀一 中島健次 大友季哉 佐藤卓 鈴木淳市 古坂道弘 岸本浩通 広田克也	委員長 中性子科学会長 施設連携 WG 長 基礎基盤部会長 中性子科学推進委員長 京大複合研 京大複合研 東大物性研 JAEA, J-PARC Center JAEA KEK, J-PARC MLF 東北大多元研 CROSS 産総研・KEK 住友ゴム KEK	清水裕彦 加倉井和久 鬼柳善明 山形豊 有馬孝尚 川端祐司 杉山正明 山室修 脇本秀一 大友季哉 佐藤卓 鈴木淳市 古坂道弘 岸本浩通 広田克也	委員長 中性子科学会長 施設連携 WG 長 基礎基盤部会長 中性子科学推進委員長 京大複合研 京大複合研 東大物性研 JAEA, J-PARC Center KEK, J-PARC MLF 東北大多元研 CROSS 産総研・KEK 住友ゴム KEK

本稿で用いる中性子のエネルギー帯名称

名称		エネルギー領域	波長領域
速中性子	FN (fast neutron)	1 MeV 以上	30 fm 以下
熱外中性子	ETN (epithermal neutron)	0.1 eV–1 MeV	0.09 nm–30 fm
遠熱外中性子	FETN (far-epithermal neutron)	20–1000 keV	30–200 fm
中間熱外中性子	METN (mid-epithermal neutron)	0.1–20 keV	200–3000 fm
近熱外中性子	NETN (near-epithermal neutron)	0.1–100 eV	0.003–0.09 nm
熱中性子	TN (thermal neutron)	20–100 meV	0.09–0.2 nm
冷中性子	CN (cold neutron)	2–20 meV	0.2–0.6 nm
極冷中性子	VCN (very-cold neutron)	0.3–2000 μ eV	0.6–50 nm
弱極冷中性子	WVCN (weakly-very-cold neutron)	100–2000 μ eV	0.6–3 nm
中極冷中性子	MVCN (mid-very-cold neutron)	5–100 μ eV	3–13 nm
強極冷中性子	SVCN (strongly-very-cold neutron)	0.3–5 μ eV	13–50 nm
超冷中性子	UCN (ultracold neutron)	300 neV 以下	50 nm 以上



目次

第 1 章	新試験研究炉に向けた中性子科学の展望	1
1.1	基礎物理	2
1.1.1	素粒子原子核物理	3
1.1.2	量子力学的波動光学	5
1.1.3	量子多体系としての原子核	5
1.1.4	宇宙核物理 - 宇宙元素合成	7
1.1.5	核データ	7
1.2	物質科学	8
1.2.1	固体物性、液体・非晶質	9
1.2.2	ソフトマター科学	11
1.2.3	生命科学	12
1.3	応用研究・産業応用	13
1.3.1	中性子イメージング	14
1.3.2	残留応力	15
1.3.3	即発 γ 線解析	17
1.3.4	材料科学	18
1.4	基盤技術	22
1.4.1	中性子源	23
1.4.2	中性子制御 (応用中性子光学)	23
1.4.3	中性子検出	24
1.4.4	測定装置	24
1.4.5	信号処理・データ処理・解析	24
1.4.6	試料調整・試料環境	24
第 2 章	新試験研究炉に対する要望	27
2.1	中性子科学から見た新試験研究炉の意義づけ	27
2.2	中性子科学会が考える基本方針	28
2.2.1	優先 4 装置：基礎的な汎用測定を可能な限り早期に確実に実現	28
	(I) 小角散乱	29
	(II) 中性子イメージング	33
	(III) 中性子回折	34
	(IV) 中性子反射率計	36
2.2.2	拠点形成と人材育成	36
2.2.3	新技術・新発想の世界最先端拠点の形成	36

2.2.4	実施の時系列	37
2.3	優先 4 装置以外の重要事項	37
2.3.1	非弾性散乱装置 (準弾性散乱装置を含む)	38
2.3.2	弾性散乱装置 (特に単結晶回折計および散漫散乱装置)	43
2.3.3	超冷中性子源	44
2.3.4	極冷中性子	47
2.3.5	近熱外中性子源	48
2.3.6	照射設備及び速・熱外中性子利用	48
2.3.7	新技術・新発想の世界最先端拠点の形成 - 中性子光学開発施設	49
2.3.8	実験建屋について	50
2.3.9	設計建設体制及び施設運営	51
第 3 章	まとめ	53
参考文献	57

第1章

新試験研究炉に向けた中性子科学の展望

物質を細かく分けていくと、やがて原子にたどり着く。さらに原子を分けていくと、原子核と電子があからさまに現れ、原子核をさらに分けると陽子・中性子や中間子が現れ、素粒子にたどり着く。そのような基本的な粒子の大半は、人間の時間尺度で見ると、ごく短時間で崩壊してしまう。また、それらの大半は電荷を帯びている。電荷を持たず、なおかつ、人間の時間尺度で認識できるような長い寿命を持つ粒子は極めて限られており、中性子とニュートリノしかない。ニュートリノは検出するだけでも大型装置が必要となるものであることを考えると、中性子は極めて特異的な粒子である。中性子は原子核外では崩壊してしまうものの、その寿命はおよそ15分と長いので、ビームとして利用する自由度が極めて大きい。中性子をそのような観点で見ると、いくつもの特徴に気づく。

1. 電氣的に中性

電氣的に中性であることから、微弱な相互作用を測定するような精密な測定に有利である

2. 高い物質透過力

物質中のわずかな体積しか占めていない原子核との相互作用が支配的であり、大半の体積を占める電子との相互作用は弱い。電子と強く相互作用する光子と比べると、物質を透過する能力が圧倒的に高い。

3. 質量が原子程度

中性子は水素原子とほぼ同じ質量を持っているので、原子に運動エネルギーを受け渡しやすい。言い換えれば、中性子の分散関係は、原子が構成要素である物質内の励起状態の分散関係に近い。このため、物質中の動的状態観察に適している。これは質量を持たない光子とは根本的に異なる特徴である。

中性子の波動性を考えると、中性子波長が原子の空間サイズに近い領域では、運動エネルギーが原子間の結合を乖離させるほどに大きく無い、ということも意味している。つまり、物質を観察するために中性子を入射させても、試料内の化学的結合を破壊して試料を変性させる危険性が極めて低い。

4. 軽元素に対する感度が高い

中性子は、原子核の種類ごとに異なった相互作用を示し、その相互作用の強さは原子核内の陽子数と中性子数に応じて複雑に変化する。実際、原子番号が小さい原子核が、原子番号の大きな原子核よりも強く相互作用する場合も多く見受けられる。光子の場合は物質内電子と相互作用するために、原子番号が大きくなるにつれて単調に相互作用が大きくなるのとは全く異なる。結果的に、原子番号の小さい元素、すなわち、軽元素に対する感度が高いという特徴を生む。

5. 同位体ごとに相互作用の強さが異なる

原子核の陽子数が同じでも中性子数が異なれば中性子との相互作用の強さが異なるので、同じ元素でも同位体ごとに相互作用が異なる。物質の状態は、主には原子間の相互作用で決まるので、元素として同じであれば同じような様相を呈する。つまり同位体を使えば、物性や化学的性質を変化させない標識を利用することができる。

6. 大きな異常磁気能率

中性子は電氣的に中性なフェルミ粒子なので、内部構造を持つ広がった複合粒子である。その結果、核磁子と同じ

オーダーの異常磁気能率を持つ。電荷がないので、電磁相互作用は磁気双極子相互作用が支配的となる。これによって、物質内磁気構造の精密な観察に利用できる。

これらの特徴を用いて、基礎物理、物性物理、化学、生物、地球惑星科学、工業・産業など、極めて広範な分野で利用されている。

さて、物理的な観点から、その広がりを見極めてみる。物質構造としては、素粒子からハドロン、ハドロンから原子核を、レプトンと合わせることで原子を、原子から分子あるいは分子集合体、そして通常の意味での物質を構成するという階層的な構造が出来上がる。各階層における構成要素は、下部構造の要素が相互作用した結果生じるものとする際には、下部階層における相互作用の多くは遮蔽されることが多く、上部階層に対しては遮蔽の不完全性が残留相互作用として影響を及ぼすと近似して差し支えない場合が多い(最たる例外は重力である)。その結果、階層別に固有の法則があるかの如く扱った方が有効であり、階層ごとにいくつもの研究分野に分かれて研究が進められる。それらの研究分野はあたかも無関係に見えるほどにそれぞれが発展しているけれども、原子の集団が呈する静的構造及び動的状態を、原子と同じオーダーの分散関係を持つプローブで観察するという観点では、中性子は数ある階層を貫く利点を持っていると言える。

中性子は、以上の利点を持ったプローブとして、さまざまな対象物を観察するために実用的に利用される。軽元素系物質の物性研究全般、分子クラスターの形態観察や相互作用測定、高分子系素材の分子形態観察、巨大生体分子の空間的相関などのマイクロからメゾスケール、工業生産物の透視による非破壊検査、動作中機関内部の可視化などのマクロスケール、大型建造物透視など人間の空間スケールを大きく超えるスケールまで多種多様である

新試験研究炉を用いることで満たされる需要、新たに開拓される需要を、原理に近い研究分野から始めて、実用的利用までを大まかに展望する。

1.1 基礎物理

近代物理学は、自然界のさまざまな現象がいくつかの基本的な法則によって司られているという事実を明らかにしてきた。本稿では、それらの基本法則そのものを探求する研究分野全般を「基礎物理学」と称することとする。根源的な物質の構成要素であるクォーク・レプトンとそれらの間に働く基本的相互作用は、相対性理論と量子論に立脚して構築された、いわゆる素粒子標準模型によって記述され、主に高エネルギー加速器を用いて取得された素粒子反応の実験結果を高い精度で再現できることがわかっている。しかし、この標準模型は、重力が他の相互作用に比べて極端に弱いこと、宇宙に物質は存在する一方で反物質がほぼ存在しないこと、時間反転対称性の破れなど、我々人類の存在に関わるさまざまな謎に答えることができていない。そのため、標準模型を超える未発見の新しい物理法則の存在が予測されており、探索が進められている。

素粒子の姿は加速器の大型化によって次々と明らかにされてきたが、そのエネルギーフロンティアは行き詰まりの様相を見せており、低エネルギー現象に僅かに現れる新物理の証拠を精密測定によって探知するという方法、言わば高精度フロンティアが脚光を浴びている。その際には、対称性や保存則が重要な鍵となる。保存則の背後には対称性が隠れていて、その対称性が破れた結果を我々は観測しているとする考え方で、電気と磁気の統一的理解や電磁相互作用と弱い相互作用の統合に成功してきた。つまり高精度測定によって対称性や保存則の破れを突き止め、そこに新物理の証拠を探すのである。

また重力相互作用はあまりにも弱いために、電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用と同じような定式化が定まっておらず、時空構造の概念そのものに修正を迫る可能性を含めて謎が多い。その弱さは実験的に挑む可能性を大きく制限しており、極めて微弱な影響を探し当てる実験的な工夫を積み重ねて、重力の謎に迫る新物理の証拠を探す必要がある。

以上をまとめると、新物理探索においては、探索に有利な素粒子や原子核を大量に生み出せる量子ビーム源と、際立った検出感度と分解能を備える超高性能検出器を組み合わせることが鍵となる。原子炉は、中性子やニュートリノを大量に生み出すという特性を持っており、その中性子とニュートリノはともに「電荷を持たない」という際立った特徴を持つ量子である。この特徴を大いに活かして、世界最高水準の研究の機会を提供し、根源的な謎を究明するためのプレイクス

ルーをもたらすことが期待される。

さて、以上のような根源的な場そのものについての謎の究明に加えて、そもそも量子論的な時間発展する系あるいは散乱状態において、特に相関が強い場合の取り扱いには一般性を持った明確な理解が得られているとは言い難い。この難しさは、極端に強い相関を持つ孤立量子多体系である原子核において顕著である。このような意味における原子核物理は、原子核の理解に限定されない一般性を持つ基礎物理である。特に中性子を用いることで、少数核子系の精密観測や、時間的に大きな状態変化を伴う核分裂や核融合反応などにおいて、自由度の拡散過程などに切り込むことができる。

また、中性子と原子核の反応断面積は、宇宙における元素合成の中でも、特に遅い反応鎖を通じた合成過程を追跡する精度を向上させるために必要である。十分な精度で理解が進めば、初期宇宙の姿や超新星などの元素合成の現場の姿を高い精度で描き出し、新たな発見につながる可能性が大いにある。

中性子基礎物理として、以上の可能性を新試験研究炉において展開することを提案し、以下、それぞれの項目について述べる。

1.1.1 素粒子原子核物理

1. 中性子-反中性子振動探索

粒子と反粒子が対称であるならば、粒子から反粒子へ、反粒子から粒子への転換が起こる可能性がある。その粒子に電荷があると、粒子と反粒子の電荷は逆符号なので、粒子と反粒子の相互転換は電荷の保存則によって禁止される。中性子には電荷がないので、中性子と反中性子の相互転換は、電荷の保存則によって禁止されることがない。無磁場空間では中性子と反中性子が相互に転換、中性子-反中性子振動 ($n\bar{n}$) が起こる可能性があるが、実際には中性子-反中性子振動は観測されたことがない。これはバリオン数の保存則によって禁止されるというのが現在の理解である。しかし、バリオン数保存則は標準模型から導かれるわけでもなく、現在のところ理論的な根拠が明確になっていない経験則である。

バリオン数保存則を破る陽子崩壊が神岡鉱山で探索が始められ、Kamiokande、Super-Kamiokande に引き継がれて陽子崩壊の探索が続けられているが、陽子崩壊事象は未発見である。

類似の法則に、レプトン数保存則 (L 保存則) があり、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$) において探索が続けられているが、これも未発見である。

さて、中性子-反中性子振動の振動周期に対するもっとも厳しい制限は、自由中性子を用いた実験としてはラウエランジュバン研究所 (ILL、フランス) での測定によって、振動周期に対する下限値 8.6×10^7 秒 (90% 信頼度) が得られている [1]。一方、Super-Kamiokande でも原子核内の中性子-反中性子振動現象が探索されており、振動周期に対する下限値として 4.7×10^8 秒 (90% 信頼度) という値が報告されている [2]。ヨーロッパ核破砕中性子源 (ESS) において現在検討されている自由中性子を用いた新しい実験は目標感度が 3×10^9 秒程度である。核内中性子を用いた実験としては建設計画がスタートしたハイパーカミオカンデの利用が考えられるが、検出器の有効体積がスーパーカミオカンデの約 5 倍止まりであるため検出感度としては $\sim 1.4 \times 10^9$ 秒にとどまる。そこで我々は、超冷中性子を用いることで従来の限界を超え、1 年間の測定で 6×10^9 秒、5 年間の測定で 1.3×10^{10} 秒までの探索を行い、さまざまな理論の予測範囲をカバーする試みを提案する。

2. 離散的対称性の破れ

素粒子標準模型はローレンツ不変で局所的な場の量子論であり、基本的対称性のもとでの変換性によって分類できる。基本的対称性は、空間反転変換 (P)、時間反転変換 (T)、荷電反転変換 (C) の三つであり、弱い相互作用が P に対して非対称であるという特徴を持つ。さらに C と P を組み合わせた CP 変換に対しても非対称であることが知られており、CP 非保存は一つの小さな複素位相として標準模型に組み込まれている。強い相互作用には、この複素位相とは別に CP を破る相互作用が許されているにもかかわらず、実験的には高精度探索でも検出されておらず、CP 非保存にまつわる一つの謎となっている。また、新物理では、標準模型に新たな場を追加されて、追加的に CP 非保存が持ち込まれることになるので、CP 非保存の探索は新物理探索の有力な手段となっている。CPT

変換はとても高いエネルギー領域になるまで対照性が保たれると考えられているため、CP 非保存は T 非保存と同等として扱われる。T 非保存は反粒子を含まない系でも測定できるため、低エネルギー領域においては T 非保存量の高精度測定によって新物理が探索される。

(a) 中性子電気双極子モーメント探索

超冷中性子を用いた研究で現在、最も盛んにおこなわれているものに中性子電気双極子モーメント (neutron Electric Dipole Moment、以下 nEDM) の探索がある。永久 nEDM の存在は時間反転対称性を破るため、CPT 保存を仮定した場合これは CP 対称性の破れと同義である。素粒子標準模型に含まれる CP 対称性の破れでは現在の物質優勢宇宙を説明することができない。現在の物質優勢宇宙を説明するためには新たな CP 非保存が不可欠であり、その一つの可能性として nEDM 探索が進められている。長年、測定感度の向上が行われているが、これまでのところ nEDM は発見されていない。SUSY、Multi-Higgs 等の物質優勢宇宙の成り立ちを説明しうる新物理では nEDM の大きさを $10^{-26} - 10^{-28} \text{ e} \cdot \text{cm}$ を予言している。一方、素粒子標準模型に含まれる CP 対称性の破れから計算される nEDM の大きさは $10^{-32} \text{ e} \cdot \text{cm}$ 程度と小さい。新理論で予言される範囲で nEDM が発見された場合は純粋に新物理の寄与ということになる。nEDM が発見されない場合も新物理の取りうるパラメータスペースに大きな制限を加えることが可能である。

現在の観測上限値は $1.8 \times 10^{-26} \text{ e} \cdot \text{cm}$ (90% C.L.) であり [3]、感度は統計精度、つまり超冷中性子密度で制限されている。PSI、TUCAN などで行われている現在進行中の実験では $10^{-27} \text{ e} \cdot \text{cm}$ の感度での測定を目指している。TUCAN では測定容器内で 250 UCN/cm^3 の超冷中性子密度での測定を目標としている。

新試験研究炉の超冷中性子源では超冷中性子源密度 10^4 UCN/cm^3 を目標とする。これを用いることで統計精度を向上させ、 $10^{-28} \text{ e} \cdot \text{cm}$ 領域での nEDM 探索が可能になる。

(b) 複合核共鳴における離散的対称性の破れ

核子間に働く力は強い相互作用が支配的であるが、わずかながら弱い相互作用が存在する。強い相互作用は空間反転対称性が保たれているのに対して、弱い相互作用は空間反転対称性を破ることから、空間反転対称性の破れを介して核子間に働く弱い相互作用の効果を観測することができる。事実、偏極した陽子ビームを無偏極陽子ターゲットに散乱させる実験において、スピン方向に応じて 10^{-7} 程度散乱断面積が変化する現象が発見されている。

一方、 ^{139}La や ^{131}Xe などの中重核が $0.1 \text{ eV} - 1 \text{ keV}$ 程度の偏極中性子を吸収し複合核状態を形成する過程では、中性子偏極方向に応じて中性子吸収断面積が最大 10% 程度変化する現象が 1980 年代ごろから発見されている。この現象は大きな s 波共鳴の裾野に存在する p 波共鳴で観測されており、空間反転対称性が異なるこれらの状態が長時間干渉する過程で s 波振幅と p 波振幅が混合し、弱い相互作用由来の小さな空間反転対称性の破れが非常に大きく増幅されると考えられている。その増幅率は最大約 100 万倍にもおよぶ。このような系では核子間相互作用に CP 対称性の破れが存在した場合、CP 対称性の破れに対しても同様の増幅効果があることが理論的に指摘されている。したがってこの増幅機構を利用することにより、核子間相互作用における CP 対称性を破る未知の相互作用を探索することが可能である。具体的には核子がパイオンを交換する際の CP 対称性の破る結合定数を測定することに対応し、上述の nEDM 探索とは異なるパラメータ空間で CP 対称性の破れを探索することが可能である。

また、本研究では 0.74 eV の熱外中性子を偏極させる必要があるが、これには偏極 ^3He ガスを用いた中性子偏極デバイス: ^3He スピンフィルターを用いる。本デバイスに関しても日本グループで精力的に開発が推進されており、J-PARC で 0.74 eV の中性子に対して 40% 程度の偏極熱外中性子ビームを得ることに成功している [4]。今後のさらなる高性能化により 70% 程度の偏極熱外中性子ビームの実現が期待される。これらからわかるように本テーマは近年急速に発展しており、新試験研究炉でも熱外中性子ビームを用いた CP 対称性の破れの探索計画を提案する。また、CP 対称性の破れのみならず空間反転対称性の破れの増幅現象それ自身が興味深い研究対象であり、核子間に働く弱い相互作用とその増幅機構の詳細な研究を行う。

3. 中性子 β 崩壊パラメーターの測定

中性子は陽子、電子、反ニュートリノに寿命約 880 秒で崩壊する。この崩壊は、標準模型のもとではクォークとレプトンに共通した弱い相互作用によって生じていると理解されている。中性子寿命をはじめとする中性子 β 崩壊パラメーターは、この理解の妥当性を基礎から支えるものであり、パラメーターの実験的な精度向上は継続する普遍的な意義を持っている。

弱い相互作用におけるクォーク間の遷移の強さは小林・益川行列で表現されるが、現在の実験値のまとめ (PDG2021) では $|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + |V_{ub}|^2 = 0.9985 \pm 0.0007$ とまとめられており、 3σ 程度でユニタリ性を満たしていない。この 1 からのずれが標準模型の破れの兆候なのかどうか、現在多くの研究者の注目を集めている。

中性子崩壊パラメーターを現在より 1 桁良い精度で測定することができれば、このユニタリ性問題と標準模型の検証ができるようになり非常に意義がある。中性子崩壊の精密測定は冷中性子ビームを使って行われてきたが、近年では超冷中性子を使うことで系統誤差を抑制した高精度測定を達成している [5]。大強度超冷中性子源を使った測定により、その精度の改善を図る。

1.1.2 量子力学的波動光学

低速中性子は量子力学的波動性を顕著に示す。この量子力学的波動性を応用したものが中性子光学であり、応用中性子光学を通じて中性子ビーム利用技術の基盤を支えている。中性子の波動性を最大限利用する物理研究を以下に挙げる。

1. 中性子干渉計を用いた未知相互作用の探索

中性子は電荷を持たないことから、電磁気力による背景事象を低減させた上で、中性子に加わる微小な相互作用を精密に測定・高感度に探索することができる。特に低速中性子は量子力学的波動性を顕著に示し、波動の時間発展を中性子散乱、中性子回折、中性子干渉などを通じてシンプルに扱える。散乱や回折においては、制御された体系つまり良くコリメートされたビームを用いる必要があり、冷中性子ビームが用いられる。近年ではパルス中性子を用いることで、運動量移行以外のパラメーターに現れる系統的不確かさを調査し、よりロバストな解析を行うことができるようになった。一方、中性子干渉計を用いた微小相互作用の測定・探索の精度・感度は、一般的に波長に比例して良くなる。中性子波動を 2 経路に分割・重ね合わせすることで経路間の相互作用ポテンシャルの差を観測できる。原子炉中性子源、特に上述の様な超冷中性子発生装置（周辺）からは、パルス中性子源では得難い長波長中性子（極冷中性子）を大量に得ることができる。

2. 大型干渉計による地球重力の精密測定

中性子干渉計の 2 経路が、地球重力場のポテンシャル差を感じて位相変化することは実験的に観測されている (COW 実験 [6])。先行研究では 10^{-2} の精度でニュートン重力と一致している。精度を向上していけば、一般相対論による効果は必ず現れる。多くの場合、一般相対論の効果は干渉計の経路が囲む面積に比例する。極冷中性子を用いれば経路と鏡のなす角度を大きくし、面積を大きくすることができる。 0.1 m^2 の面積、波長 1 nm の干渉計が実現すれば、最も大きな一般相対論的補正項である運動学的赤方偏移による位相変化が 0.1 rad のオーダーで、重力場のひきずり効果である Lense-Thirring 効果による位相変化が 10^{-7} rad のオーダーで現れる。加えて、この精度が実現されれば、Chern-Simons 重力などの修正重力理論に迫れるかもしれない。また、高密度の超冷中性子を用いてこの量子化分布を高統計で精密に観測すれば未知短距離力探索や等価原理の検証を行うことが可能になる。

1.1.3 量子多体系としての原子核

1. 希少安定原子核および不安定原子核の散乱長の精密測定

原子核は有限個の核子が核力によって互いに強く結合した量子多体系である。したがって、核子間のポテンシャルが正確にわかっているならば、核子の運動方程式を厳密に解くことによって原子核の性質を解明することは原理的には

可能である。しかしこのような厳密解法による原子核の取り扱いには現実的には難しい課題が多数存在する。これら乗り越えるためには収束性の高い計算手法と精度の良い核力ポテンシャルまたは核子間ポテンシャルの情報が必須である。それらの知見はまた、強相関電子系や磁性体の性質を扱う理論に対してもヒントとなることが期待される。近年進歩した原子核殻模型および数値計算の計算結果と高精度な実験データを比較することで、核子間ポテンシャルを詳細に調査することが可能であるが、たとえばカイラル摂動理論の計算誤差は数%以下であるため、実験データにもそれと同等またはそれ以上の精度が要求される。そのような高精度を望み得る測定量としては、原子核の質量や束縛エネルギー程度しか存在しなかったが、近年、中性子干渉計を用いた散乱長の高精度測定が実現した。そこで冷中性子干渉計を用いることによる希少安定核および比較的寿命の長い不安定核を含む軽核 - 中重核領域での散乱長の系統的測定を提案する。例えば照射設備にて中性子を吸収させ生成した不安定原子核を含む試料を干渉計に挿入することで、存在比 0.1% の同位体の散乱長を 1 日の測定で精度 1% で求めることができると見積もられる。このように、大強度冷中性子ビームと大型冷中性子干渉計を用いることで、希少な安定核や長寿命不安定核の測定も可能になるものと期待される。

2. 中性原子核

原子核は陽子と中性子から構成される有限量子多体系である。陽子-中性子のスピン 3 重項状態が重陽子として束縛するのに対し、中性子-中性子などのスピン 1 重項状態は非束縛であることから、複数個の中性子のみで作られる中性原子核 (多中性子核) は存在しないと広く信じられている。中性原子核の探索は 1960 年代より様々な手法で試みられてきたが、そのほとんどは否定的な結果であった [7]。しかしながら、今世紀に入って 4 中性子からなる状態 (テトラニュートロン, ${}^4\text{n}$) の存在を示す結果が相次いでいる。現時点では、4 つの中性子からなるテトラニュートロンの束縛状態ないし共鳴状態が存在することの実験的証拠は決定的でない。

テトラニュートロンを筆頭とする中性原子核がどのような形態で存在しうるか探ることは、原子核物理において実験・理論両面が連携しながら喫緊に取り組むべき重要な課題の一つであると言える。実際に、理化学研究所などにおいてテトラニュートロンに関する研究が複数展開されていることから、近い将来テトラニュートロンに関する知見がアップデートされることは大いに考えられる。一般の生成反応で実現される分解能のもとでは、共鳴状態か束縛状態かをはっきり区別するのは困難である。そこで、長寿命の中性原子核の束縛状態を探索する実験を新試験研究炉で実施することを提案する。

我々の把握している限り、原子炉における研究は 60 年間行われていない。その間の放射線計測技術の進展 (なお先行研究では NaI(Tl) が用いられていた) や不安定核に対する知見の蓄積に鑑みて、探索の感度を大幅に向上する余地は大いにある。

3. 複合核共鳴の詳細測定

2.3.5 節で述べる近熱外中性子ビームを用いて複合核共鳴状態から放出される γ 線の分岐比を詳細に測定することにより、複合核の統計モデルの検証を行うことが可能である。核データや原子核物理の分野において、特に中重核に関して複合核状態はハミルトニアン行列要素を統計的に扱ったランダム行列理論 (RMT) で説明できるとされており、実際に RMT の予言通り共鳴準位間隔は Wigner 分布、中性子幅分布は Porter-Thomas 分布に従うことが知られている。しかしながら共鳴準位間隔において RMT で説明できない周期的な分布が確認されているなど、複合核状態は未だ未解明な部分が多い。RMT によると放出される γ 線分岐比についても Porter-Thomas 分布に従うことが予測されているが、複合核共鳴ごとに γ 線分岐比の測定が行われた例は少ない。測定例が多い中性子幅分布は複数の共鳴に対する統計性の確認であるのに対し、放出 γ 線分岐比の統計性はそれぞれの共鳴における統計性の確認につながるものであり、系統的に異なるものであるとともに、特異な共鳴の発見につながる可能性もあり重要である。実験は熱外中性子源から供給可能な 3 eV 以下程度のエネルギーが低い近熱外中性子ビームを単色化し、共鳴ごとに放出される即発 γ 線を測定することにより、 γ 線分岐比を決定する。これを複数の核種や共鳴に対して行い、それぞれで統計性を確認することで RMT の検証並びに、RMT がどこまで適用できるかなどを系統的に研究することが可能である。また共鳴ごとの全角運動量も放出される γ 線の測定によって決定することがで

きる。現在の核データライブラリに掲載された全角運動量の値は、測定されている核種・共鳴が少ないため、多くの場合において確率分布に従いランダムに割り振られた推定値であり、本測定により実験的に決定することで、核データの充実やそこから波及する様々な分野への応用へとつながる。

4. 偏極中性子を用いた核分裂反応の測定

U や Pu などの核分裂過程の研究にも 2.3.5 節で述べる偏極熱外中性子ビームは有効である。これら原子核が偏極中性子を吸収するとそのスピン方向を量子化軸として変形し、二つ以上の核分裂片に分かれる。三つ以上の核分裂片に崩壊する際には中性子吸収後の複合核は回転しながら分裂するため、中性子偏極方向に依存して三つの分裂片の放出方向が非対称な分布を持つことが知られている。これは Rotation(ROT) 効果と呼ばれ核分裂がどのような変形を経て起きているか、核分裂片が互いにどのように相互作用するかを知る上で重要な情報を提供する。これらは ILL をはじめとした原子炉中性子源で冷中性子や熱中性子に対して研究されているが、U や Pu は近熱外中性子に対しても多くの複合核共鳴を持つ。熱外中性子源から供給可能な 0.1 – 3 eV 程度の中性子に対して複合核共鳴を形成した後の ROT 効果を測定することは核分裂現象を詳細に理解する上で興味深い研究テーマである。新試験研究炉では偏極熱外中性子ビームを用いて共鳴ごとで ROT 効果の測定を行うことができる。さらに、偏極中性子に伴って複合核が重い質量片と軽い質量片に分裂する反応をもちいて、ROT 効果の測定と同時に核分裂反応における空間反転対称性の破れの精密測定も可能である。

5. アイソマー生成比の測定

Am, Cm などは 0.1 – 10 eV の近熱外中性子に対して複数の複合核共鳴状態を持ち、これらの共鳴状態は γ 崩壊の過程で長寿命なアイソマーを生成する。これらは原子炉で生成される高放射性廃棄物として生成され、長期にわたる主要な放射線源となっている。それぞれの複合核共鳴状態から生成されるアイソマーの生成比が異なるため、原子炉内の中性子エネルギー分布に依存して生成される高放射性廃棄物の寿命が異なる。熱中性子炉に限らず近年着目される新型革新炉開発においても、放射線量評価のためにこのような核データが必要である。しかしそれぞれの共鳴状態から生成されるアイソマーの生成比は同定されておらず、したがってどのような過程でアイソマーが生成されるかを研究することは原子炉設計および高放射性廃棄物の寿命を予測する上で重要である。原子核に単色化された 0.1 – 3 eV 程度の近熱外中性子を照射し、発生する γ 線エネルギー、アイソマーの寿命を測定することにより、それぞれの共鳴からのアイソマー生成比を測定することができる。

1.1.4 宇宙核物理 - 宇宙元素合成

自然界には 90 種の元素、約 260 種の安定同位体が存在する。これらの元素や核種がいつ、どこで、どのように作られたのか、またレアメタルやレアアースなどの元素はなぜ稀少なのか、などの問題は、17 世紀に近代的元素観が芽生えて以来、今日までの自然科学の根本的課題である。原子核物理と天体物理に基づいて理論的に予測される元素の生成量と、天文観測やさまざまな試料の分析から得られる元素の存在比とを比較することで、元素や各種が生成された物理過程を理解する試みが精力的に行われている。その際、不安定核を含むさまざまな原子核に関するデータが必要となる。安定同位体の中性子捕獲反応断面積については、過去数十年以上にわたる測定の積み重ねにより、大半のデータが取得済みである。一方、不安定同位体の中性子捕獲断面積については直接測定された例が極めて少ない。そこで我々は、比較的長い半減期を持ち、中性子照射標的として用意しやすいいくつかの不安定同位元素について、中性子放射化法による断面積測定を提案する。

1.1.5 核データ

核データとは、工学や理学などの様々な分野で必要とされる原子核の反応、壊変、構造に関わるデータの総称である。特に中性子核反応データは原子炉工学において基礎となる物理量であるため核データ研究の中でも最も長い歴史を持つ。原子炉の炉心は、燃料だけではなく減速材や構造材など様々な物質から構成されるため多くの核種の中性子核反応断面積

が必要になる。また、炉心内の中性子エネルギーも 10 MeV から 1 meV 程度まで分布しているため、広いエネルギー範囲に対応した中性子核データが必要となる。

以上の工学的な要請に応えるためにこれまで評価済み核データライブラリとして中性子核データがユーザーに提供されてきた。主要な核データライブラリとしては、米国の ENDF/B-VIII.0 や日本の JENDL-5 が挙げられる。現在、800 核種程度の中性子核反応データが核データライブラリに格納されている。これらの核データライブラリは、それぞれの核種について入手可能な実験データや核反応理論モデルを用いた核データの評価を行い、現状データから推奨できる断面積等の数値データを提供している。当然のことながらライブラリで提供される核データの信頼性はベースとなる実験値の精度で決まってくる。理論予測が難しい物理量もあるため、そのような場合は実験データが特に重要となる。

核反応理論モデルによる予測が難しい物理量のひとつとして熱中性子捕獲断面積が挙げられる。熱中性子捕獲断面積の測定には、原子炉での放射化法が広く行われている方法であり、測定を行うために炉内に照射設備をもつ研究用原子炉が必要不可欠である。熱中性子捕獲断面積のデータの現状としては、安定核種については、ほぼデータは整備されているが、近年では、核廃棄物の核変換研究などに関連してマイナーアクチニドや長寿命核分裂生成物等の放射性核種の測定が重要となっている。また、2 段階中性子捕獲による不安定核種の生成量も重要な核データとして注目されている。例えば、ハフニウムは原子炉の制御棒として広く使われているが、二重中性子捕獲反応 $^{180}\text{Hf}(n,\gamma)^{181}\text{Hf}(n,\gamma)^{182}\text{Hf}$ により生成される ^{182}Hf は 900 万年の半減期を持ち原子炉の解体・廃棄において問題となる。したがって、廃炉において ^{182}Hf の生成量を評価する必要があるが、中間核種の ^{181}Hf の中性子捕獲断面積の精度が悪いため生成量計算の不確かさが大きい。そこで ^{180}Hf を原子炉で照射し二重中性子捕獲反応を起こし放射化法により ^{182}Hf の生成断面積を求める方法が考えられる。ただし、これを行うには高い中性子束 ($10^{13} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 以上) で長時間照射 (6 ヶ月程度) ができる研究用原子炉が必要である。

即発ガンマ線分光法も断面積測定法として有効な方法である。放射化法の欠点として中性子捕獲反応による生成核種が安定核種の場合には適用できないことが挙げられる。この解決法として即発ガンマ線分光法が活用できる。即発ガンマ線分光法では原子炉からの中性子ビームを試料に照射し、そこから放出される即発ガンマ線をゲルマニウム検出器等のガンマ線検出器で測定する手法である。即発ガンマ線は中性子捕獲反応が起これば必ず放出されるため放射化法のような制約はない。

また、放射化法の欠点を補う別の方法として同位体質量分析が挙げられる。これは照射後試料を同位体質量分析により生成核種の生成量を測定し捕獲断面積を導出することができる。したがって、高精度の質量分析装置を研究炉施設内に設置することが強く望まれる。加えて分析前に照射後試料を扱うためのホットセルも必要である。

最後に核データ測定においては中性子源や照射装置の性能以上に施設の RI 試料や核燃試料の取り扱いの法令上制約が問題となることが多い。バックグラウンドの少ない測定を行うには密封ケースに封入されていない非密封の放射性試料を測定することが望ましい。また、原子炉で照射して生成した放射性核種を中性子ビームラインに設置して測るようなことができるまでできなかった測定ができるようになる。さらに上では述べなかったが、核分裂反応の核データは原子炉工学において極めて重要な物理量である。核分裂反応の測定には施設が核燃試料取り扱いの許可を得なければならぬ。J-PARC や JRR-3 では、これら非密封 RI 試料、核燃試料の取り扱いの制約から測定を断念した核種も多い。したがって、核データ測定の観点から新研究炉には非密封 RI 試料や核燃試料を測定試料として扱える施設であることを望む。

1.2 物質科学

アボガドロ数に代表される巨視的な数の原子の集合体は、個々の原子からは想像もできない特性を顕わにする。ある原子の集団は絶対零度まで固化しない一方で、他の原子は 3000°C の高温でも固体であり続ける。はたまたある原子は集団になった時に磁力を帯びるが、他の原子は電気抵抗なしに電流を流し続ける超伝導状態になる。原子は分子として結合し水のように非常に単純ではあるが生命に欠かせない液体を形成する一方で、生体高分子のような複雑で自己組織化する原子集団もある。これら複雑怪奇な現象がたかだか 100 種類程度の原子の組み合わせから生じることには驚きを禁じ得ないところであり、このような巨視的であるがゆえに生じる物質の多様性を理解することが物質科学の目的である。

1.2.1 固体物性、液体・非晶質

巨視的な数の原子や電子の集合体はそれらの持つ時間・空間相関により分類できる。液体は構成する原子が時間的にも空間的にも相関を持たない凝縮系であり、水に代表される通常の液体のみならず、液体ヘリウムに代表される量子液体、また電子スピンの液体状態であるスピン液体等が活発な研究対象となっている。凝縮系において時間的な相関が保たれている一方空間的相関が失われている物質群、すなわち液体におけるランダムな原子配列がそのまま凍結したガラスとよばれる物質群、さらに時間・空間相関においてガラスと類似性が見られると考えられているスピングラスや電荷ガラス等の物質群は現代的な研究対象となっている。空間・時間相関の両方が保たれた原子の集合体は多くの場合構成要素が空間並進対称性を有して配列する結晶を形成するが、結晶物質の示す多種多様な物性現象は物質科学の中心的課題である。例えば、結晶構造の小さな歪みに起因する誘電現象やその磁性との交差相関現象であるマルチフェロイック現象、結晶中の電子スピンの空間・時間相関の発達による磁性現象、さらには逆格子空間における波動関数の連続性に起因するトポロジカル絶縁体等のトポロジカル現象、時間・空間反転対称性の欠如がもたらすワイル電子状態等、結晶や磁気秩序の持つ周期性がもたらす新奇な物理現象は枚挙にいとまがない。また、3次元空間に顕な並進対称性を持たないがより高次元空間での並進対称性に特徴づけられる準結晶、並進対称性ではなく自己相似性により空間相関が特徴づけられるフラクタル構造等も重要な研究対象である。結晶は、また、極低温や超高圧等の極限環境と合わさることにより、よりドラマティックな現象を発現することがある。極低温で液体ヘリウムが示す粘性無しの流動現象(超流動)や、ある種の金属の示す抵抗無しの電気伝導(超伝導)等は巨視的な数の原子・電子が示す量子現象として精力的に研究が進んでいる。他方、地球の内部に代表される超高温・超高圧環境における物質科学研究は、物質科学のみならず地球科学や惑星科学の観点からも非常に興味深い。近年発見された水素化物における室温(近傍)超伝導は、巨視的な量子現象が極低温に限らないことを示した非常に大きな発見であろう。

これら物質のバルクとしての特性のみならず、近年その表面や界面に現れる特異現象、構成要素を連続体として見ることができ程度に大きな空間スケールを持つ現象、さらには外部からのエネルギー注入に起因する非平衡現象等に大きな注目が集まっている。上述のトポロジカル絶縁体においてはその表面にトポロジカルに保護された金属状態が形成されるものと考えられ、その利用が大きな議論となっている。また、トポロジカル物質や超伝導物質と磁性体の界面等における新奇現象の探索も大きな研究テーマの一つである。磁性体等において強磁性配列から少しだけねじられたスピン集団は時にスキルミオンに代表されるトポロジカルなスピントクスチャーを形成することがあるが、これも一大研究テーマとなっている。また時間的に変動する外場がもたらす非平衡現象、特に周期変動場における非平衡定常状態(例えばフロッケ状態)等はこれからの物質科学のフロンティアとして現在精力的な研究が始まったところである。

これら多岐にわたる物質科学研究課題とそれらの研究に用いられる中性子散乱装置群の関係は空間・時間相関、空間・時間スケール、そして中性子に特に重要なスピン自由度という3つの側面から整理できる。

1. 空間・時間相関

構成原子・スピンが無限時間の時間相関を有する場合(すなわち「静止」している成分がある場合)、中性子散乱では「弾性散乱」(すなわちエネルギー遷移ゼロの散乱)が観測される。従って弾性散乱を効率よく測定する装置が必要になる。中でも、原子・スピンが無限距離までの空間相関を有する場合(多くは並進対称性を示す結晶になる)、弾性散乱はシャープな回折斑点(ブラッグ反射)を示すことが多い。このような物質群においては、種々のバリエーションの中性子粉末・単結晶回折計が有効に機能する。

原子・スピンに無限距離までの空間相関が認められない場合(ガラス等)、弾性散乱はブロードなピークを示す。このような散乱に対しては一定の波数範囲の散乱を一度に効率よく測定できる全散乱装置等が有効に機能する。

構成原子・スピンが無限時間相関成分を有する場合においても、運動する成分が協力的に存在する。このような原子・スピンの集団運動はフォノン・マグノンに代表され、原子集団の特徴を理解する上で非常に重要な現象である。これらの現象は、後述するように運動の時間スケールに依存するエネルギー領域に中性子非弾性散乱を生じ

る。従って、種々のバリエーションの中性子非弾性散乱装置が有効に機能する。

構成原子・スピンの無限時間相関成分を有さない液体的状態に関しては、中性子全散乱装置等を用いた近似的全散乱測定が行われる一方で、低エネルギー領域の非弾性散乱を測定する準弾性散乱測定も重要である。

2. 空間・時間スケール

単純液体や通常の結晶・磁性体等においては、凝集体を構成する構成要素(原子・スピン)の空間スケールは 0.1 nm (10^{-10} m) 程度であり、それらの運動を特徴づけるものは温度(例えば室温、エネルギー換算で 25 meV、時間スケールとして 10^{-13} 秒)程度である。従って、これらの物質の研究に用いられる中性子散乱装置としては、粉末・単結晶中性子回折装置に対しては 10nm^{-1} (10^{10}m^{-1}) を中心に十分広い波数範囲をカバーすることが、さらに非弾性散乱装置に対しては波数範囲に加えて、数十 meV 程度を中心に十分広いエネルギー範囲をカバーすることが要求される。

他方、極低温における量子現象等の研究に用いられる非弾性散乱装置においては、温度スケールや量子揺らぎのスケールに対応する超高エネルギー分解能測定が必要になる。時には μeV 領域に迫るエネルギー分解能が必要になることがある。

液体・結晶・磁性体における近年話題の大きな構造(スピントクスチャー等)においては、その構造スケールが 1000nm に近づくものもある。この場合中性子測定装置の波数スケールは空間スケールの逆数に対応して極めて小さなものとなる。波数 $Q \sim 0.01\text{nm}^{-1}$ をカバーする小角散乱装置やそれ以下に達する極小角散乱装置等が必要になる。このような大きな構造の持つダイナミクスは非常に遅いものになるため、その研究には超低散乱角領域の超高エネルギー分解能非弾性散乱装置が必要になる。

表面や界面においては、表面内・界面内とそれに垂直な方向で大きな空間スケールの違いがある。特に興味を持たれるのは垂直方向であり、積層スケール等に起因して小さな波数領域の研究が行われる。この目的には中性子反射率計等が用いられる。またこの領域の非弾性散乱測定は表面・界面・フィルム等の応用的にも非常に重要な物質群の性質解明に欠かせないものであるが、現時点でこのような測定を可能にする一般的な装置は見当たらず、先駆的な研究が行われ始めている。

3. スピン自由度

他の散乱手法に比較して中性子散乱を大きく特徴付ける点として、中性子磁気散乱のスピンの検出能力がある。中性子そのものがスピンを有するため、原子核による核散乱に加えて、物質中の電子や原子核の持つスピン(微小磁石)による磁気散乱過程が存在する。特に電子スピンによる散乱は原子核による散乱と同程度の散乱強度を持つため、中性子散乱においては物質中の電子スピンの検出を(X線散乱等に比較して)非常に高感度に行うことができる。初めに述べたように、現在の物質科学の多くの課題は、スピン自由度を有する巨視的な数の電子が強く相関することによって生じる現象の解明である。従って、中性子のもつスピン検出能力がその解明や応用開発に有用であることは論を俟たない。例えば、現在精力的に研究が進んでいるマルチフェロイックスやスピントロニクス分野においては、物質中や表面・界面のスピンの構造やそのダイナミクスの理解が非常に重要である。また、トポロジカル物質においてもスピン配列(磁気構造)が本質的な役割を果たすことがある上に、現代においてはスピンの運動が形成する準粒子のトポロジカルな性質の応用も考えられている。超伝導現象において形成される電子対のスピンの状態解明は継続的に重要な課題である。

これらの電子スピンとその相関が生じせしめる現象の理解には上述の種々の回折・分光法に中性子スピンの偏極解析技術を組み合わせることが極めて重要である。すなわち偏極中性子粉末・単結晶回折装置を有することにより、物質中の磁気構造をより詳細に調べることができるとともに、ヘリシティ・カイラリティ等に起因する現象解明が可能になる。非弾性散乱と偏極解析を組み合わせた偏極非弾性散乱技術により、磁気励起と格子励起の明確な区別が可能になるだけでなく、磁気準粒子の一方伝播等に関する情報等スピントロニクス応用に重要な情報が得られるであろう。上述の準弾性散乱装置に偏極解析を組み合わせることで、多体スピン系の巨視的量子性や連続性に起因する極低エネルギー領域でのスピン現象の解明が可能になるであろうし、中性子反射率計に偏極解析を組み合わせる

偏極中性子反射率計、中性子小角散乱と偏極解析の組み合わせである偏極中性子小角散乱は磁性多層膜、大きなスケールの磁気テクスチャー等の研究に大きく活用されている。空間的長距離相関を有さないスピン系に関しては偏極磁気散漫散乱測定装置が非常に強力に機能する。

4. 物質研究のフロンティアとその実生活への波及効果

物質科学研究は物理学の一つの分野として巨視的な数の原子・電子系が有する普遍性を解明するという基礎的側面に加えて、それが現実存在する物質を対象としているが故に、その発展が本質的に実生活に役立つという側面を持つ。この観点からは、実用はあくまで波及効果なのだが、近未来の実用と関連があるものを列挙することにも大きな意味があるものと考えられる。

- 非平衡状態、特に非平衡定常状態

凝縮系物理学がその基盤をおいている枠組みの一つに（量子）統計力学があるが、これは基本的に平衡状態近傍を記述する。平衡状態から大きく離れた非平衡状態、さらにはエネルギーの流入と流出の釣り合った非平衡定常状態の解明は現代の凝縮系物理学の大きな課題であるとともに、実用材料作成のプロセスやその機能の多くが非平衡現象を利用しているという観点からも、その理解には大きな意義がある。例えば、流れの中での結晶成長や自己組織化などが考えられ、流動下の新機能材料の創出や化学合成の革新に直結するかもしれないし、光励起後の遷移などは光エネルギー変換や光学素子に直接的に関連する。また、非平衡な定常状態には、平衡な定常状態にはない、新たな巨視的状态が存在する。動的状態間の遷移の理解も同様の波及効果が考えられ、究極的には生命現象につながるかもしれない。

- Topological 物質・スピントロニクス

Topological 物質の界面やスピントロニクスなどは、無散逸デバイスにつながる可能性が考えられ、飛躍的な省エネルギーにつながるかもしれない。

- 量子コンピューター

一般に、量子力学的二準位系は量子ビットとして、量子コンピューティングに直結する可能性がある。現状は超伝導デバイスが用いられているが、topological 物質の界面、核偏極などが安定に高精度で制御できるほどに研究が進めば、実用に至る可能性がある。それ以外にも、Haldane 状態、Kitaev 状態など、巨視的量子状態の研究には潜在的な可能性が含まれている。

1.2.2 ソフトマター科学

ソフトマターにおける非平衡現象の解明が新試験研究炉で推進すべきソフトマター研究の一つの方向性と考えられる。ビーム強度が強ければ実際に動作している電池の内部での反応している状態を直接観察するようなオペランド測定、その場観察が可能である。現在電池関連の開発は非常に早いペースで進んでいるが、容器の中にあるキャリアそのものを直接観察できる中性子は将来に渡って重要な手段となるであろう。

また、汎用で大型の小角散乱装置だけでなく、目的特化型の実験装置の場合、必ずしも中性子強度は高くない可能性がある。そのような場合でもガラスの変形の長期プロセス、粘性の高い物質の観察、高分子の結晶化プロセス、非常にゆっくりとした化学反応で数日を要するようなものなど、超スローダイナミクスである非平衡現象の解明の研究が可能となる。巨大中性子施設の場合、実験装置、試料環境装置などを長期に渡って占有したり、例えば 1 週間おきに定期的に測定することなどは課題採択のやり方を含め、現実的には実現が困難である。新試験研究炉の一つの方向性となる可能性が高い。産業利用として、製品・食品などの長期間の劣化プロセス、促進試験では得られない長期安定性の保証、性能変化などの原因解明なども考えられる。

1. 反射率計によるサイエンス

物質の表面、界面ではさまざまな現象が起きている。空間が切断されている、あるいは別の物質との界面になっていることで、高分子、界面活性剤のコンフォメーションがバルクのそれとは全く異なってしまうことから始まり、

表面に存在する化学物質、その反応、あるいは膜タンパク質の形状変化が引き起こす現象など、多種多様な現象が起きている。反射率計、特に水面上で測定が可能な試料水平型反射率計はそのような現象を研究する上で欠かせない装置である。

2. 非弾性・準弾性散乱によるサイエンス

ソフトマターには一つの原子レベルの非常に早い振動から、高分子の比較的大きな部分の動き、レピュテーションのような非常に遅い運動まで、非常に広いエネルギーレンジ、Q 領域に渡る準弾性、非弾性散乱の測定が必要になる。

1.2.3 生命科学

生命現象は核酸・タンパク質・脂質などの生体高分子や有機分子が互いに相関しながら様々な機能を担っている。個々の生体高分子の構造に関しては近年放射光 X 線、XFEL による結晶構造回折、クライオ電顕、NMR、X 線小角散乱 (SAXS)、計算機化学などによる構造解析が急速に進んでおり、膨大な数の生体高分子の構造情報が蓄積されている。また、その時間構造に関しては計算機科学、NMR、HS-AFM、HD 交換質量分析、動的散乱、FCS などにより多くの情報が集められている。

これらの手法に加えて、中性子結晶構造解析、中性子小角散乱、中性子準弾性散乱、非弾性散乱などの中性子の手法と計算科学・化学の手法を組み合わせることで、特に水素結合に寄与している水素の位置、その動き・振動、溶液中での柔らかな動きを持った内部構造などの情報を加えることができる。したがって、生体高分子などの構造と機能との相関の解明を目指す、前述の様々な手法を合わせた今後の構造生物学の主流である統合構造生物学の研究推進に中性子は不可欠な手法となっている。

また、これらを支えているのが生体高分子試料を中性子散乱に最適化して作り上げるための試料作成の新しい手法である。例えば、タンパク質の各ドメインを切り貼りするライゲーション技術、タンパク質の大量発現技術、生体高分子の重水素化率を制御した高度重水素化技術、タンパク質の単結晶を巨大化技術などである。これらは中性子散乱の手法と一対をなす重要なものである。測定の直前に試料を準備することが望ましいため、生化学実験環境がビームラインに隣接していることが重要となる。これは、今後研究が進むほどに、必然的に要求度が高くなるものである。

そして、これらで得られる基本的情報の土台の上に、さまざまな生命現象、病原菌との相互作用、生体高分子と薬物等の相互作用の基本的理解を進めることで将来の創薬などにつなげることができる。

中性子小角散乱装置による研究

中性子小角散乱装置は第一次建設装置群の一つである。この装置の利用としてはソフトマターの研究と並んで生体高分子の構造・ダイナミクス研究がマシンタイムの大きな部分を利用することになると思われる。また、生体高分子のダイナミクス情報をより詳細に得るためには中性子小角散乱装置と計算科学の組み合わせに加えて、時間相関関数を実測できるスピネコー装置、準弾性散乱装置での測定の組み合わせが不可欠である。

タンパク質が実際に機能しているのは、結晶というような固定された形状ではなく、水との相互作用をしながらかなり柔軟に形状を変化させている。このような状況の中で、中性子小角散乱の空間分解能は結晶構造解析に比較して劣るものの、溶液中で揺らぎのアンサンブル平均を実測できる点がユニークな手法である。将来的には細胞内環境を模倣した。(In-cell) 多成分混合系の測定までも実現する可能性まであり、手法開発が進められている。

中性子の手法では、部分重水素化することで、タンパク質の任意部分をラベリングすることができ、SAXS で測定される全体構造に加えてさらに情報量を増やすことができる。特に分子動力学計算などによる計算科学的な手法と中性子散乱を比較することで得られる情報は他の手段では得られないものである。

例えば、中性子小角散乱装置を用いて日本で現在進められている研究としては、次のようなものがある。

1. 白内障の病変の機序を知る上で重要な凝集抑制機能を担っている α -クリスタリンの水晶体模倣環境下での動態研究
2. 生体における概日性を司っている時計タンパク質の機序の研究

3. 天然変性タンパク質の溶液構造・ダイナミクス研究

中性子回折を用いたタンパク質構造解析による研究

今後、構造生物学分野で中性子回折を用いたタンパク質結晶解析 (NPC: Neutron Protein Crystallography) の需要の高まりが見込まれるため、この流れを先取りする戦略が重要と考えられる。

タンパク質に X 線を用いる際、X 線照射によって電子が放出され、試料が還元雰囲気中被置かれて構造が変化する可能性を検討する必要があるという問題点がある。そのため、Folding 構造のようなタンパク質の構造決定には、クライオ電顕を用いることが主流になっていくと考えられる。X 線回折の需要が減少するという事ではないが、先端的研究の手段というよりも、一種の分析手法として利用されることになると思われる。

さて、構造生物学の最終目標は、タンパク質などの構造を解明することである。そのためには、分子最外層に位置する水素原子の振る舞いについての知見を欠くことができない。電子顕微鏡は X 線と同じく主たる相互作用が電磁相互作用であり、水素原子の散乱能が小さいことから、水素原子の詳細な観測は困難である。水素原子を直接観測するのに有効な手段は中性子回折のみであり、当面、代替手段が見当たらない。しかも、中性子が原子と同じオーダーの質量を持っているために、波長を原子間隔に取った時の運動エネルギーが小さく、中性子照射による試料の損傷が極めて小さい、という利点も併せ持っている。

ただし、中性子回折では良質な大型単結晶が必要とされる点が難点であるとされる。しかし、これは技術的な進展が見込める分野であり、特に衛星軌道上の微小重力下での結晶育成研究が一つのブレークスルーとなると期待される。

このような背景のもと、タンパク質構造解析を目的とした中性子回折装置が中性子源施設に設置されることが一般的となっている。それは、中性子源が定常源であるかパルス源であるかということに原理的には無関係だが、現実的には、X 線回折の手法が直接利用できる定常中性子源の方が需要に直結しやすい。ここで、検出器を例にとって議論する。優れた角度分解能で大きな立体角を覆って回折中性子を高い効率で検出する必要があり、パルス中性子源の場合には、信号のタイミングという情報を付け加えて計測する必要が生じる。つまり、定常中性子源では積分型検出器で十分であるのだが、パルス中性子源ではパルス計数という機能を付け加える必要が生じる。このような事情は検出器に限らず、データ解析なども同様であり、定常中性子源であれば X 線回折で用いる解析ツールをそのまま利用できる。今後、パルス中性子源における測定技術は改良が進んでいくと期待されるが、現状では定常中性子源からのデータ解析結果がパルス中性子源より良質で、現時点で最良質データを出しているのは単色法 + 中性子イメージングプレート型検出器を使った、FRM-II の装置 BIODIFF であることを考慮すると、十分な強度が確保された条件で長波長が使える研究炉ガイドホールへの中性子タンパク質単結晶回折装置の建設が必須であると考えられる。なお、タンパク質構造解析では試料準備の効率が極めて重要であるため、重水素化施設の整備、ビームライン近傍での生化学試料準備設備も求められる。新試験研究炉において、大強度の長波長中性子 (弱極冷領域) をガイドホールに導き、タンパク質構造解析を目的とした中性子回折装置を整備することが欠かせないと思える。

1.3 応用研究・産業応用

本文書では、産業応用と物質科学との境界領域を応用研究、実際の生産現場を産業応用と呼ぶこととする。産業から見た応用研究との関係を考えるに、現在の瞬間は、材料からモノへ、さらにはサービス・安全・安心という方向に考えが流れているが、それは普遍的なものでは決してなく、行きつ戻りつと順序を入れ替えながら繰り返して発展していくものである。産業そのものを長期的に展望することは困難であるし中性子学会の範疇を越えるので、産業が今後中性子を利用する際に必要になるであろうことについての展望を議論することとする。

応用研究や産業利用にとって重要なことは、分析・解析技術を確実に継承し、利用の必要性が発生したときに、即座に利用できる体制にあると言える。これは深刻な問題で、少子化等で日本人研究者が減少していることもあり、従来のように利用現場の人材に頼る体制を進めるのであれば、国外の常勤研究者・ポスドクなどを積極的な受け入れを検討することも必要かもしれない。一方で、中性子利用方法や解析結果を表現する方法を体系化して、非専門家が中性子利用を活用し

やすくして、省力化を図るという方法も考えられる。このような省力化は、産業利用に限らず、中性子利用全般にとって重要であることは明らかであるが、産業利用においては、迅速かつ効率的な分析結果を利用する必要性が極めて高いため、特に重要である。

この節では、分析対象の空間スケールをマクロからマイクロに向けて追う順序で議論する。

1.3.1 中性子イメージング

中性子イメージングは、水素を含む物質がよく見え、金属に対する透過力が高いなどの特長がある。このため、X線などの他のプローブでは観察できない対象物へ応用でき、材料科学、土木・建築、物理、電気・機械、電池、農学、文化財・考古学などの広いサイエンス・産業分野に使われている。特に、金属に対する高い透過力のため、工業製品などの実製品内部の非破壊可視化計測が可能となる極めてユニークな手法である。

中性子イメージングは、透過強度による画像の濃淡で内部の構造を見るという測定が従来から行われてきた。画像の空間分解能は数 100 μm から数 10 μm が一般的であるが、最近では 10 μm を切る空間分解能を実現している。将来は中性子顕微鏡などの進展などによって、更なる高空間分解能化が進んでいくと予想される。さらに、実際に稼働している工業製品の観測では、高速度撮影における時間分解能の向上も望まれている。

一般的な中性子イメージングでは、中性子全断面積が物質で異なることを利用しているが、冷中性子を用いた新しいイメージング手法の開発も近年進められている。一つは偏極中性子による物質内および空間における磁場の測定である。既に、磁性材料の磁場特性や回転するモーターによる磁場の動きなどが測定されている。また、位相コントラスト法は、中性子の屈折を利用するもので、低エネルギー中性子でその影響が顕著になる。この手法では、エッジが強調して見えるため、通常の中性子イメージングでは見えにくいものも見ることができる。また、磁区などを測定することもできる。このように、新しい手法が冷中性子を用いて開発されてきており、今後も冷中性子を用いた新手法開発は重要になって来ると考えられる。以上のような種々のイメージング手法を用いることによって、単なる内部構造を見るということだけでなく、材料特性の研究なども行われている。

今後の中性子イメージングの応用先として、サイエンスだけでなく産業利用への親和性が非常に高いため自動車・機械、素材などが、新試験研究炉においても、その利用が依然として期待される。そのため、「サイエンス」と「産業利用」の両方を見据えた装置が設置されるべきであり、その具体的応用先としては、

- カーボンニュートラルに向けた革新的技術開発
- データサイエンスを活用した高分解能処理による現象解明
- 考古学（古生物学も含む）の発展に資するサイエンス開拓

などへの展開がより重要になると考えられる。さらに、現在は積極的な応用が進められていないが、ライフサイエンス分野への展開を新研究炉においては本格的に実施すべきと考える。また静的な構造観察から物質移動・組織解析、化学反応・組織形成などの解析がより一般的な応用先になると考えられる。

イメージング装置としては、従来手法も依然として重要であり、熱中性子イメージング装置および冷中性子イメージング装置の両方が必要とされる。熱中性子イメージング装置は、従来型の透過イメージングを主たる目的とし、高い中性子強度・広い照射野であることが望まれる。短時間撮像、3次元 CT 撮像、動画撮像などをターゲットとする。一方、冷中性子イメージング装置は、冷中性子ハンドリングの容易さをいかして、高空間分解能イメージングや偏極中性子、中性子干渉を利用した特殊なイメージング手法の利用、新しい撮像技術の開発を目的とする。高空間分解能イメージングや新手法の開発、様々な応用の展開のためには、高強度の冷中性子源が必須である。さらに、中性子イメージング実験では、水素などの可燃性ガスや大電力電源が利用できることが求められ、それらが比較的容易に利用可能な施設であることが望まれる。

1. ビーム需要概算と必用性能

(a) J-PARC と JRR3 が並行して運用されている場合

KUR の代替施設としての位置付けとして利用される。必要性能は、

- 大面積の特殊実験（熱中性子イメージング）
- 本格的な定常の冷中性子イメージング実験用施設

最も需要が低い条件であり、KUR の過去の運転時間を想定し 100 日程度の運転が必要である。

(b) J-PARC が運用されていて、JRR3 が運用されていない場合

大強度中性子イメージング施設としての役割を担う。必要性能は、

- 大面積の特殊実験（熱中性子イメージング）
- 短時間撮像・動画、オペランド実験
- 本格的な定常の冷中性子イメージング実験用施設

需要が高い条件であり、JRR-3 と同程度の運転時間を想定し 170 日程度の運転が必要である。

(c) J-PARC が運用されておらず、JRR3 が運用されている場合

冷中性子イメージングの利用環境としてのニーズがあるが、KUR の代替施設としての位置付けが強い。必要性能は、

- 大面積の特殊実験（熱中性子イメージング）
- 本格的な定常の冷中性子イメージング実験用施設

需要はこの条件の中では中位であるが、KUR の過去の運転時間を想定し 100 日程度の運転が必要である。

(d) J-PARC と JRR3 がともに運用されていない場合

国内唯一の大強度熱・冷中性子イメージング施設としての役割を担う。必要性能は、

- 大面積の特殊実験（熱中性子イメージング）
- 短時間撮像・動画、オペランド実験・本格的な定常の冷中性子イメージング実験用施設

需要が最も高い条件であり、少なくとも JRR-3 と同程度の運転時間である 170 日程度の運転が必要である。

これ以外に、人材育成や技術開発を目的とした時間を十分に用意するべきである。具体的には海外の他施設を参考に 50 程度を配分されることが望ましいと考える。

2. ユーザーコミュニティの規模

既存の中性子実験施設のユーザー数／申請課題数等の利用状況から類推できるユーザーグループ数は 80~90 程度になると考えられる。ヘビーユーザーとして定期的に利用するグループは 10 グループ程度と見込まれる。

1.3.2 残留応力

次世代材料の性能発現理解及びその製造プロセスの設計、次世代材料の機械部品状態の製造後、使用中での特性評価などで、中性子回折を用いた応力測定が必要になる。特に、取得データの可視化したり力学的モデルと結合したデータ分析を柔軟に実行できるようにすることで、対象物内部の応力分布を拡大して微小な応力変化を発見しやすくしたり、応力分布のバラツキに埋もれた系統的变化を抽出しやすくするなどの工夫が重要になると考えられるこのような方法論を体系化することで、単なる測定機会の増大にしないことが肝要である。

既存の施設のアップグレード版という理解であれば、実施する研究の新規性及び発展性が求められると考えられる。例えば日本の西部の産業利用の特色を打ち出し、そのための研究施設、装置の整備を図るなどの工夫があるとよいと思われる。応力測定分野でのサイエンスは、おそらく以下が考えられる。

- 次世代の材料の性能発現理解及びその製造プロセスの設計
- 次世代の材料の機械部品状態の（様々な方法で）製造後、使用中での特性評価
- コンピューティングとデータ分析をスケールし拡大及び埋もれたものの発見

例えば、従来から使用されてきた鉄鋼材料は組織制御等で機械的性能が大きく向上され、その要因としては組織が極微細になったり、複相になったり、マルチモーダルになったりして、また、変形中に単純な転位すべりの他に面欠陥の導入や相変態等を利用するようになった。燃料車が主流である現在、鉄鋼材料が 60-70 % の割合で使用されており、このような鉄鋼材料に関する開発は軽量化と安全向上のために行われているが、電気自動車になるとエンジンの回転数が大きく上がることによる軽量化がさらに重要となり、また、ギアも重要な部品の一つになる。これらの理由で、今後、鉄鋼材料をはじめとする他の金属材料の機械特性向上開発が継続的に行われると考えられる。現在、新材料として流行っているハイエントロピー合金及び高強度軽合金（マグネシウム合金、チタン合金等）は、10 年後にホットトピックスとして継続的に行われなくてもいいかもしれないが、このような新概念の材料は次から次へ出てくる可能性は高い。次世代の材料の機械部品状態の（様々な方法で）製造後、使用後のマッピングによって、応力、欠陥、集合組織等の分布を調べることで特性発現機構を調べることができて、新知見の発見やさらなる応用へのフィードバックとなり得る。

今後の材料の研究・開発にはおそらく機械学習やスパースモデリング等の活用は大きな鍵になると思われる。材料はこれからも様々な基盤となるので、研究対象として変わらないが、材料や部品の種類が変わってくると考えられる。ただ、研究のスタイルは、中性子実験だけでなく、計算・データ科学との併用的な利用は必要不可欠であり、これによって研究を大幅に促進する。例えば、計測においては、ひずみマッピングは全領域にわたって細かく測定する必要はなく、数カ所の測定だけとデータ科学との併用で調べたいことがわかるような測定手法の開発が必要になってくると考えられる。

一方、国内では、原子炉中性子源と加速器中性子源が常時稼働しているのはきわめて好ましい。福井炉が汎用性の高い小角散乱、イメージング、反射率、回折の装置整備でスタートするのは妥当であるが、長期的には「この施設でなければできない特長」を作ること重要であろう。

西の産業でいえば、ほんの一例ではあるが、福井鯖江市はメガネが有名でその生産量は全国の 8 割程度である。この地場産業に際しては、レンズの性能、フレームの軽量化などが要求される。前者は反射率、後者は素材開発、材料強度評価などを実施する必要があり、そのためには反射率装置、応力測定装置が必要である。

1. 必要な装置・装置性能

応力測定に必要な性能としては短時間で精度良く測定ができることである。

- フラックス：参考のできる装置でいえば、20MW 運転の OPAL のガイドホールに設置されている KOWARI で、試料位置では $7 \times 10^6 \text{ n cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (モノクロメータと集光状態による) に近づける。炉心近くに設置する場合、フラックスがもう少し高くなるかもしれないが、試料のハンドリングや実験種類等の制限が発生すると思われる。
- ピーク分解能：金属欠陥解析も目指すのであれば、 $\Delta d/d \sim 0.3\%$ が必要
- 応力測定をメインしているのであれば、0.11~0.13 nm 範囲の面間隔 d (Fe の 311 又は 211、Al の 311 のピークを参照) が散乱角 $\sim 90^\circ$ で測定できるようにする。すなわち、メイン波長が 0.17 nm であるが、可変にする。
- ラインプロファイル解析、相分率解析や集合組織の測定等のためには、 $50^\circ \sim 165^\circ$ 範囲の散乱角をカバーすることができるようにする
- 2次元検出器 $(15-20)^\circ \times (15-20)^\circ$ 程度
- ラジアルコリメータ：1 mm、2 mm、3 mm、5 mm、10 mm、散乱スリットも使えるようにする(場合によって、将来併用する可能性あり)
- 搭載荷重 1 トン程度の試料テーブル；稼働範囲：回転 $\pm 180^\circ$ 、XY 方向にそれぞれ $\pm 300 \text{ mm}$ 程度、上下 $\sim 500 \text{ mm}$

2. 年間当たりのビーム需要概算

人材育成も行うのであれば、余裕のビーム運転が望ましく、ANSTO のような運転の仕方が参考になる。年間 300 日運転で、200 日は課題実験に使用し、100 日は内部スタッフの装置開発や教育のために使用する。

(a) J-PARC と JRR3 が並行して運用されている場合

年間 200 日運転：課題実験実施用 100 日間、内部スタッフ・教育用：100 日間 J-PARC の TAKUMI と JRR3

の RESA で賄いきれない課題実験が年間 100 日以上と予想しているが、その数値は年々増加していくと予想。

(b) J-PARC が運用されていて、JRR3 が運用されていない場合

年間 300 日運転：課題実験実施用 200 日間、内部スタッフ・教育用：100 日間現在の RESA で行われている実験日数 + α と予想し、200 日以上必要。

(c) J-PARC が運用されておらず、JRR3 が運用されている場合

年間 330 日の運転：課題実験実施用 280 日間、内部スタッフ・教育用：50 日間 TAKUMI で行われている実験日数 × 測定効率の差 + α と予想し、300 日かそれ以上が必要。

(d) J-PARC と JRR3 がともに運用されていない場合

年間フル運転しても不足すると思われる。

3. ユーザーコミュニティの規模

JRR3 が 10 年近く運転しておらず、最近の応力測定に関するユーザー動向は把握できていないが、J-PARC のユーザーを参考にして、人数、研究室数、企業数などについての見込みは次のとおりである。

- 人数：約 400 人（下記のグループにそれぞれ 4 人と仮定）
- 研究室：国内 43 程度、国外 36 程度
- 企業：22 程度

1.3.3 即発 γ 線解析

中性子誘起即発 γ 線分析法 (PGA) は炉内中性子から中性子導管を通して導かれた熱あるいは冷中性子ビームを分析試料に照射し、試料内のターゲット核種と中性子との中性子捕獲反応の際に放出される即発 γ 線を Ge 半導体検出器により測定し、その γ 線エネルギーから元素（同位体）、その γ 線ピーク強度から元素（同位体）の存在量を分析する手法であり、物質に対して透過力の大きい中性子と高エネルギーの即発 γ 線を用いることから、固体バルク試料の確度の高い非破壊・多元素同時分析が可能であることが特徴である。また、同様に中性子を用いる中性子放射化分析法 (NAA) では分析が困難な、水素、ホウ素、塩素、硫黄等の軽元素の分析も可能であり、NAA に比べ照射後の残留放射能も小さく、PGA 分析後に他の質量分析法などによる分析も可能である。

これらの特徴から、素材中の不純物の分析、考古遺物の分析、隕石の組成分析、農産物の分析、中性子補足療法 (BNCT) における血液中ホウ素の分析、各種標準物質の認証分析に利用されてきた。固体バルク試料の高確度の非破壊・多元素同時分析としては、爆発的に需要が増えることは期待できないが、今度 50 年においても代替分析にとって代わられることはないかと思う。

PGA は NAA の一手法であり、炉内照射を用いる NAA と組合せ相補的に利用することが効果的・効率的である。そのためには、照射後試料の化学処理と放射能測定のできるホット実験室、更には、他の破壊分析法と合わせて分析が可能なコールドの化学実験施設と分析センター組織が併設されると更に効果的である。

PGA の試料環境を広めにとっておくと、中性子ディプスプロファイリング測定 (NDP)、中性子誘起メスバウアー分光実験、中性子パルス実験等の汎用的な純中性子場としての展開が可能である。

JRR-3 の PGA 装置で行われているような、自動測定の試みは利用者の利便性と測定効率の向上に有益である。

1. 必要な装置、装置性能

以上の展望に基づいて、即発ガンマ線分析・放射化分析に対して必要な装置、装置性能などを要望の形にまとめると次のとおりである。

- 10^7 – 10^8 $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ レベルの冷あるいは熱中性子ビーム。
- 曲導管を用いた、炉内放射線、高エネルギー中性子を含まない冷/熱中性子ビーム。
- 出来れば冷中性子ビームの方が有利、 $1/v$ 則に基づいて高感度の分析が可能。
- 測定にはコンプトンサプレッション測定が可能な Ge-BGO 検出器

- バックグラント低減のための、Li タイル、テフロン素材等を用いた試料環境の校正。
- 中性子強度よりもバックグラント低減に着目した装置設計。
- 多関節ロボット等を用いた自動測定システムの構築
- 照射後試料の化学処理と放射能測定のできるホット実験室
- 他の破壊分析法と合わせて分析が可能なコールドの化学実験施設
- 分析センター組織の併設あるいは連携
- 民間の分析サービスの参入があると理想的。

2. 年間当たりのビーム需要概算

PGA の需要については、J-PARC、KUR にも類似の装置があるが、分析用途ではあまり利用されないようである。JRR-3 でもまだ、10 年前の需要までは戻り切れていない。ただ、定性的な回答ではあるが、PGA 装置の需要は、年間 100 から 160 日程度のマシンタイムに相当すると思われる。

3. ユーザーコミュニティの規模

またユーザーコミュニティの規模は次のとおりである。

- 人数 50 人程度
- 研究室数 10 研究室程度
- 企業数 10 社程度（民間の分析サービスがあればスポットで利用する企業は多いかと思います。）

本節について、文献 [8] に、より詳しい記述がなされている。

1.3.4 材料科学

材料科学は、物性研究とその応用研究の境界領域であるとも言え、産業への応用を意識している場面も多い。そして、生産活動においては、モノを作っている以上、材料科学的な知見を得るための材料分析がなくなることはないと考えられる。ここでは材料科学の展望を議論し、産業とのつながりについて示唆を与えることを試みる。

一つの例として、鉄鋼材料に注目してみる。従来から使用されてきた鉄鋼材料は組織制御等で機械的性能が大きく向上した。その要因としては組織が極微細になったり、複相になったり、マルチモーダルになったりして、また、変形中に単純な転位すべりの他に面欠陥の導入や相変態等を利用するようになった。燃料車が主流である現在、鉄鋼材料が 60-70% の割合で使用されており、このような鉄鋼材料に関する開発は軽量化と安全向上のために行われているが、電気自動車になるとエンジンの回転数が大きく上がることによる軽量化がさらに重要となり、また、ギアも重要な部品の一つになる。これらの理由で、今後、鉄鋼材料をはじめとする他の金属材料の機械特性向上開発が継続的に行われると考えられる。

現在、新材料として流行っているハイエントロピー合金及び高強度軽合金（マグネシウム合金、チタン合金等）は、10 年後にホットピックスとして継続的に行われなくてもいいかもしれないが、このような新概念の材料は次から次へと登場する可能性は高い。次世代の材料の機械部品状態の（様々方法で）製造後、使用後のマッピングによって、応力、欠陥、集合組織等の分布を調べることで特性発現機構を調べることができて、新知見の発見やさらなる応用へのフィードバックとなり得る。

今後の材料の研究・開発にはおそらく機械学習やスパースモデリング等の活用は大きな鍵になると思われる。材料はこれからも様々な基盤となるので、研究対象として変わらないが、材料や部品の種類が変わってくると考えられる。ただ、研究のスタイルは、中性子実験だけでなく、計算・データ科学との併用的な利用は必要不可欠であり、これによって研究を大幅に促進する。例えば、計測においては、ひずみマッピングは全領域にわたって細かく測定する必要はなく、数カ所の測定だけとデータ科学との併用で調べたいことがわかるような測定手法の開発が必要になってくると考えられる。

1. 材料科学において評価、分析、検査、開発が期待される物質、材料、研究分野

材料科学の観点から、評価、分析、検査、開発が期待される物質、材料、研究分野を列挙する。

まず、第一に中性子の軽元素識別能、特に水素に対する感度を生かした研究が挙げられる。生命科学の観点からは、

重水素化試料準備技術を利用することで、生体内環境に近い環境での高次構造や機能の研究を推進することが重要であろう。無機材料としては、水素貯蔵媒体や金属水素化物が挙げられる。水素社会を目指す上で、水素貯蔵に関する材料開発は避けて通れない問題である。また有機材料としては、樹脂・高分子材料の研究が挙げられ、生産活動に直結した材料科学である。

中性子の透過力を活かした研究として、鉄鋼材料などの構造材料分野、製品レベルでの試料評価、土木分野などが挙げられる。

ミクروسケールからメゾスケールにわたる構造情報から、材料物質の持つ特性の発現を理解することで、次世代材料開発を加速したり、次世代材料を利用した機械部品を組み上げた後の総合的な性能を推定したり、使用中の特性評価を実施することで、極めて高い付加価値を伴った生産活動につながると期待される。鉄鋼材料内のメゾスケール構造計測から、高付加価値鉄鋼材料の開発研究に直結した研究は発展目覚ましい研究分野である。

材質の研究に加えて、構造材料内部の残留応力計測や結晶面間隔の透視画像化技術を利用した製品レベルあるいはそれに近い形での構造評価、あるいは信頼性評価は、工学上の学術意義に加えて、実用上の信頼性や寿命推定情報などの新たな付加価値を生む大きな可能性が期待される。これは大型構造物にも適用できる可能性があり、コンクリート透視などは土木分野に波及する大きな潜在能力である。

また中性子は試料の深部に容易に到達することから、高圧・高温などの極限環境下の金属材料特性や結晶構造変化の研究は、新材料開発につながると考えられる。また電子デバイスとしての誘電体、磁性体、半導体などの微量ドープ元素の定量及び状態観察に利用が期待される。

さらに物質表面あるいは物質界面の物性は、部材の機能を決定づける場合も多い。機器中の流体の可視化は、内燃機関や配管、さらにトライボロジーの精度を飛躍的に向上させるものである。また、結晶及び非晶質にわたって、固体/固体、固体/液体界面の反応により形成されるナノ界面物質のナノレベルを解明することも期待される。

材料研究では、材料特性の発現機構の解明が不十分な状態でも、有用な材料特性を発現させる条件を迅速に見出す能力も問われる。そこで、様々な計測結果を経験的かつ総合的に解析するコンピューティングに組み込んだ上で、局所的と大域的情報を同時に計測可能な中性子計測結果を統合することで、新たな材料特性を見出す能力を飛躍的に進歩させる可能性を追求することに大きな意義があるであろう。

そして、原子炉施設が担うべき課題として、原子力材料や照射された試験片、放射化した機械部品の残留応力やメゾスケール計測などがある。このような特殊な材料研究は、次世代革新炉や廃炉技術を戦略的に発展させるために、極めて重要な研究課題である。

理工学範囲を超えた応用として、京都・奈良の文化財、考古学資料や伝統工芸の分析など、根底で材料科学とつながった文理融合分野は、中性子ビームが活躍する大きな可能性を秘めた分野である。

2. 材料科学が求める中性子施設

以上、材料科学が担う分野は極めて広いため、中性子利用上の専門知識を前提としなくとも、迅速に利用可能な体制は欠かせない。具体的には、試料の設置・交換や実験装置の操作が、迅速かつ容易に行える実験環境が必須であり、可能であればユーザーが直接操作できるような環境があれば理想的である。さらに得られたデータの扱いなどを学習できるような情報提供も必須である。これは中性子計測を立案する上でも必要となるものであり、中性子利用を体系的な専門知識の集約は極めて重要である。

まず、材料科学にとって必要な試料環境を列挙する。これらは物質科学と共通するものが多いが、特にその利用におけるサポート体制が用意されていることが極めて重要である。

- 低温、高温、磁場、電場、雰囲気、引張、圧縮、除湿、加湿、低圧、高圧、不活性ガス・水素・重水素ガス雰囲気、マイクロ波、光照射
- 水素・重水素ガス利用設備（燃料電池）
- 動的核スピン偏極
- オペランド実験環境、in-situ 実験環境

- 外場印加や試料合成と中性子測定を組み合わせた in situ 実験環境 (DX 実験環境)
- 微量試料測定
- 大型試験体用の耐荷重のある試料ステージ

次に、材料科学にとって必要な解析環境は次のようなものである。これらも物質科学と共通するものが多いが、特にその利用におけるサポート体制が用意されていることが極めて重要である。

- 機械学習 (AI) やスパースモデリング等の活用による解析
 - 既存施設と共通した解析ソフトウェア。特に J-PARC で頻繁に利用されているものと同一のソフトウェア
- そして材料科学に必要なラボや設備として、次のようなものが考えられる。
- 試料の品質評価に必要な基本的な設備等、測定試料の準備や測定後の試料の健全性評価等に必要な機器、評価・解析に必要な機器 (前処理・後処理設備)
 - 試料に温度・圧力等の条件を付与できる設備
 - 試料の実験用セルへの封入や秤量が可能なグローブボックス
 - X 線、TEM、SEM 等の測定機器 (構造解析のハイスループット化) ナノテクプラットホーム測定機器や依頼分析等に対応できるものはそれらを活用
 - 重水素化ラボ
 - 放射化試料や核燃料物質の取り扱い設備
 - 試料環境機器の開発・整備に必要なラボ
 - 光学系の開発等に必要なラボ

3. 材料科学に必要な連携

材料科学は、さまざまな研究分野にまたがり、なおかつさまざまな研究施設を組み合わせる利用することが多く、なおかつ迅速な研究進展が求められる分野である。そこで、さまざまな組織との連携を促進することが特に重要となる。

まず、地域企業や大学・研究機関との連携が出発点になると考えられる。国や県との連携で「特区制度」等を活用して民間参入を促すなどの仕組みがあることが望ましい。例として、若狭湾エネ研との連携やあいち SR のような県の技術センターを隣接させることが有効だと考えられる。

国内の放射光施設との連携は高い有効性を発揮すると期待されるので、建設段階から強い連携を取ることを求めたい。そして、JRR-3 や J-PARC での継続実験の機会が提供されるような連携システムが有効であると考えられる。中性子特有の付帯設備として高い優先度を持つ重水素化試料準備施設には、地域大学がキーとなって全国の大学の化学系の研究室との連携を取ることが重要と考えられる。さらに分離融合分野を開拓する上では、貴重な史料を扱う必要が生じることもあり、博物館や文化財の専門家との連携が有効であろう。

4. 材料科学にとって重要な施設利用上の条件

ここで、材料科学に携わる中性子利用者が強く希望する施設利用上の条件を列挙する。これらは材料科学に限らず、中性子利用者が共通して求める条件である。

- 研究者が利用・アクセスしやすい環境
- サイエンスパークのようなマテリアルを扱う企業や研究所の集積
- 研究者間の交流を促す部屋の配置
- 材料科学の実験室と研究者
- 中性子光学系、重水素化技術、試料環境の開発、計算科学、MDX の人材
- 宿泊施設、食堂、売店
- その場観察やオペランド測定のためにユーザーが特殊な試料環境装置を容易に持ち込める環境
- 情報科学との融合を軸とした研究センター、中性子データ規格の標準化、中性子データの DX 化の最先端施設
- 「使い易さ」: 初心者にも十分な実験の機会の提供

- 短い申請から実験までの期間
- メールインサービス
- オンライン測定
- 企業の技術者や学術の専門外の人々が利用したくなる解析結果まで出してくれるサポート体制
- 企業ニーズに詳しいアドバイザーや先輩研究者に随時相談できる体制
- 西日本の研究者が積極的に利用したくなる単なるラボレベルでない施設
- J-PARC に比べて中性子源の進化がある施設
- J-PARC で実現できないことにチャレンジする施設

5. 必要な装置群

どのような装置が必要かという点についてのまとめを示す。概ね、JRR-3 や J-PARC の装置と同等以上の性能の装置が必要とされている。

参考までに、中性子科学会会員のうち、材料科学に関係する会員 35 名の意見分布は次のとおりであった。

粉末回折装置	16 名 (45.7%)
小角散乱装置	15 名 (42.9%)
イメージング装置	14 名 (40%)
反射率計	12 名 (34.3%)
非弾性散乱・準弾性散乱装置	5 名 (14.3%)
即発ガンマ線分析装置	2 名 (5.7%)

(a) 粉末回折装置 (16 名 45.7%)

- i. 匠のような TOF 装置
- ii. RESA のような装置
- iii. HERMES の 10 倍の強度の装置
- iv. 粉末回折計
- v. 工学回折計
- vi. ANSTO の WOMBAT のような大面積 2 次元検出器を持つ装置
- vii. 長い格子面間距離 d が測定可能な装置
- viii. 応力測定+螺鈿のようなイメージング装置、応力測定+ HRPD 装置
- ix. 試料環境：恒温、超低温、加熱、冷却、変形、ガス雰囲気
- x. ホット試料や核燃料物質を扱える装置

(b) 小角散乱装置 (15 名 42.9%)

- i. 汎用装置+先端装置 各 1 台
- ii. SANS-U のような装置 2 台
- iii. SANS-J のような装置+動的核スピン偏極
- iv. ANSTO の Bilby のような TOF 装置
- v. JRR-3 の装置と MLF の装置を組み合わせた小角・広角散乱装置
- vi. Bonse-Hart 型の USANS 装置
- vii. 跳ね上げ型光学系+回折装置+剪断
- viii. 試料環境：加熱、冷却、変形、重水素化

(c) イメージング装置 (14 名 40%)

- i. JRR-3 のような装置
- ii. 螺鈿のようなエネルギー分析型の装置
- iii. フラックス $10^8 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 以上、大型機器 (1m³, 1t 程度) 設置、螺鈿と同程度の測定室、水素等の可燃

性・支燃性ガス、大電力利用、特殊条件（発火現象、爆裂等）のその場観察を許容

iv. 反射率イメージングが測定できる装置

v. ホット試料や核燃料物質を扱える装置

(d) 反射率計 (12 名 34.3%)

i. SHARAKU や SOFIA のような装置

ii. MLF と同程度のオペランド測定に期待。無理であれば、反射率測定オプションを備えた小角散乱装置

iii. ANSTO の Platypus のような装置

iv. GI-SANS が測定できる装置

(e) 非弾性散乱・準弾性散乱装置 (5 名 14.3%)

i. DNA のような装置

ii. ILL の IN5 のような装置

iii. UCN + SANS + NSE の構造・ダイナミクス解析装置

(f) 即発ガンマ線分析装置 (2 名 5.7%) JRR-3 の PGA のような装置。局所分析を行えること。

6. 年間運転日数

参考までに、中性子科学会会員のうち、材料科学に関係する会員 35 名の意見分布を示す。35 名の全回答者のうち 24 名 (68.6%) が具体的あるいは目安となる日数を示している。これを度数分布として図 1.1 に示す。他 1 名から「できるだけ長く」という回答があった。JRR-3 の運転日数と比較して、それよりも短い日数の期待もあるが (17.1%)、長い日数 (JRR-3 の運転日数 ~300 日) の期待が過半数という結果となった。

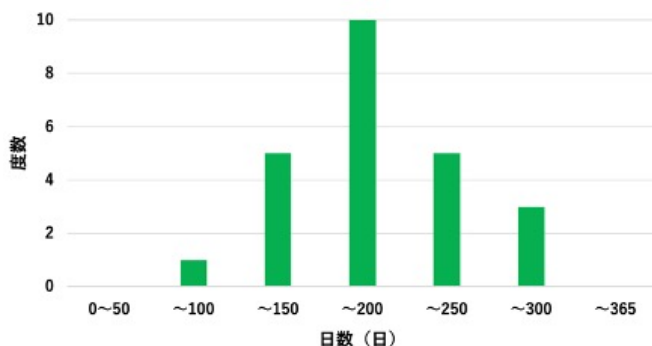


図 1.1 期待する年間運転期間

新試験研究炉の定期点検期間を、JRR-3 の定期点検期間、J-PARC の運転停止期間とずらし、何れかの施設を常に利用できる状態にすることが求められる。また、内部スタッフの研究、教育のための運転期間を確保して、利用上の技術情報の質を継続的に準備しておくことが重要である。

1.4 基盤技術

中性子利用を支えるためには、中性子を利用する上での基盤技術を一定の水準に維持する必要がある。したがって基盤技術の継承は、中性子科学全体にとって不可欠のものである。しかしその意義は単に維持すべきものというものとどまらず、新たな研究手法を生み出す原動力となったり、新たな研究分野の開拓につながったりする極めて重要なものである。特に計測精度を極限まで高める必要があるような分野では、基盤技術そのものに学術的意義が付される場合も多い。ただし、革新的な基盤技術を生み出すには時間がかかるため、中性子施設などからの継続的な支援が不可欠である。日本は基盤技術の革新を先導した経験を持っており、現在もこの分野で世界をリードする立場にある。新試験研究炉では、これらの実績を基礎として基盤技術をセンター化して組織的に推進することで、中性子強度に頼らずに、世界的な先端研究拠点

として中性子科学をリードすることが重要である。またこのような技術の集約は、それ自体が一つの高付加価値型の産業であり、先進的基盤技術を国内外に向けて供給する産業拠点を形成することで、中長期的に中性子科学を継続的に支える仕組みづくりが欠かせない。

1.4.1 中性子源

節 2.3.3 で説明する通り、冷中性子源の設計は、冷中性子から極冷中性子にかけての中性子強度及びスペクトルを大きく左右する。これは減速体そのものもさることながら、引き出し光学系との結合の最適化がいかに重要であるかを物語っている。

また、同じく節 2.3.3 で説明する通り、現在国内では世界初の金属基板反射光学の研究が進んでおり、これは減速体周辺光学系として実用できる可能性が高く、冷中性子及び極冷中性子領域の低速成分の引き出し効率の飛躍的向上が見込める。これは超冷中性子の高強度発生にもつながる。これは実用上の意義だけでなく、それ自体が学術的意義を持つ日本発の革新的中性子光学技術として、世界的に評価されるものと期待される。

さらに近熱外中性子用の高温減速体は、移行エネルギーを大きく取った中性子散乱や複合核過程を利用した基礎物理などの研究分野を開拓する有用なものである。多層膜積層技術の進展と金属基板反射光学を組み合わせることで、近熱外領域の中性子輸送工学系の実現の可能性が浮上しており、世界に先んじた画期的な中性子利用となることが期待される。

中間熱外・遠熱外・速中性子のビーム利用は、原子炉技術に関連した材料科学や原子核物理に限定されるものと想定される。しかし、研究分野の広さと意義が比例するわけではない。これは他の研究手段では得られない原子力工学の基礎データとして、原子炉施設として推進すべき研究内容である。

1.4.2 中性子制御 (応用中性子光学)

日本は中性子反射光学において世界を先導してきた実績を持ち、多層膜反射光学系の研究能力は今も高いレベルを保っている。従来、多層膜光学系の適用波長範囲は熱領域よりも長波長側に限定されてきたが、近熱外領域にまで広げるだけの技術が実証されている。近年では、金属基板反射光学系の研究が進み、精密機械加工技術と組み合わせることで、高精度の自由曲面光学系を世界に先んじて実用化する水準に達している。このような基盤技術は、計測系のアクセプタンスに合わせてビームエミッタンスを整形する中性子輸送光学系を柔軟に用意する基盤技術を有していることを示している。

これに加えて、中性子スピンの有感な磁気光学系は電磁的な中性子制御をもたらすものであり、スピントリップチョッパーによる電磁的ビーム振り分けが J-PARC において実用化されている。電磁的チョッパーであるため、その動作は極めて高速かつ柔軟であり、最大のデューティーで原子炉の定常ビームをパルス化することに利用できる。

さて、スピン交換光ポンピングを用いた偏極 ^3He の開発においても高い開発技術を有しており、新試験研究炉においても中性子スピンを利用する場面で活躍することが期待される。現在、適用エネルギー範囲は近熱外にまで拡張できる大型セルの開発も進んでおり、まもなく、近熱外以下のエネルギー範囲で汎用的に利用できるようになると期待される。

これらを組み合わせる例として、近熱外偏極中性子に対して、近熱外反射光学を利用したスピントリップチョッパーが可能となれば、パルス化された熱外中性子を提供できるようになり、新試験研究炉の定常ビームを使って、近熱外領域の非弾性散乱 (準弾性散乱) を実現できる可能性も存在する。

また、現在、動的核偏極技術の研究が進んでおり、従来は水素あるいは重水素原子核の偏極に限定されてきた動的核偏極を一般原子核に拡張する取り組みが進んでいる。静的・動的核偏極を利用して、核偏極試料を柔軟に利用することができれば、中性子スピンを最大限活かした特徴ある研究を、物質科学分野及び基礎物理分野双方で展開可能と考えられる。

以上のように中性子施設として極めて重要な基盤技術を推進するためには、開かれた研究体制の構築と高度な専用設備の整備が必要である。

1.4.3 中性子検出

中性子光学技術と同様、中性子検出技術も中性子ビーム利用の基盤技術の中でも極めて重要度が高いものの一つである。検出器研究は、比較的、大学における研究活動を集約しやすい分野であり、開かれた研究体制が重要になる。ただし、実用化するためには、検出器性能の維持や一定数の検出器生産能力が求められるため、中性子施設側に集約点を設ける必要がある。

検出器のタイプとしては、現在最も広く用いられているガス検出器である単芯及び多芯の比例計数管に加えて、パターン電極のガス検出器、二次粒子飛跡検出型のガス検出器、また、シンチレータ検出器などが実用的に用いられている。半導体検出器の利用も基礎技術レベルで研究されている。これらは即時読み出し型の検出器であり、即時読み出しという特性はパルス中性子源の利用では必須の条件である。

然るに、新試験研究炉は定常中性子源であり、積分型検出器の利用も柔軟に考えるべきである。その好例が原子核乾板である。原子核乾板に中性子感度を付与する研究が進んだ結果、 μm を下回る位置分解能が実現している。また原子核乾板の特性上、画像検出にそのまま利用できるという特長を持っている。このような高精細の位置分解能を持った撮像検出器は、中性子イメージングに限らず、大面積の検出として利用できる可能性を秘めている。原子核乾板を利用するためには、原子核乾板の製造、現像、読み取り装置群が必要であり、これらを新試験研究炉の施設として整備することで、柔軟な運用を実現することが妥当と考えられる。原子核乾板は、設置の柔軟性において他の検出器とは格段の優位性があり、取得データの解釈も直感的に理解できるという特性も持ち合わせており、新試験研究炉の特色とすることができる。

1.4.4 測定装置

中性子散乱装置の設計を、中性子源から検出器までを総合的に考慮に入れて最適化することは極めて重要である。そのためには、それぞれの中性子散乱手法が持つ解析能力を客観的かつ定量的に把握し、最適化の度合いや他施設の関連散乱装置との差異を明確化することが必須である。それは、各ユーザーの個別測定それぞれに応じて測定方法の選択や、散乱装置内の個別機器の設定パラメーターを最適化することを可能とする。

このような見通しの良い装置最適化及び運用技術の体系化は、世界的にも立ち遅れている重要項目である。新試験研究炉において、このようなアプローチを戦略的に展開すれば、単に施設の高度化というだけでなく、一つの学術分野形成も可能であると考えられ、標準化された定量評価指標として継続的にアップデートする体制をとることで世界的な標準として確立することも可能と考えられる。さらに、このような体系化・標準化・学術化は、初学者が座学で専門的知識を得る機会を提供したり、学生の教材としても利用したりできると考えられ、中性子利用を大きく広げるために必要な事柄である。そして、新試験研究炉が中性子科学の重要拠点として最先端施設という位置付けを確立することにもつながると考えられる。

1.4.5 信号処理・データ処理・解析

中性子検出器の信号を処理して蓄積する電子回路群は、検出器性能を決定する。また取得した信号を記録するデータ構造は、その後のデータ処理及び解析の柔軟性を決定する。これらを長期間にわたって維持するためには、汎用性を十分に検討した上で、柔軟性を失わない規格化およびその維持体制を整備する必要がある。これはユーザーの研究内容や解析方法の進歩に応じて迅速に更新される必要があるため、開かれたシステム設計及び運用を導入することが肝要である。

1.4.6 試料調整・試料環境

中性子散乱測定において、試料調整作業や試料環境パラメーターに対する依存性の測定は、分野をまたいで求められる事柄である。そこで、試料調整を行うための装置群や試料環境を制御するような試料環境を整備することは、中性子利用

を大きく広げることにつながる。試料環境として考えられるものは、試料温度、磁場印加、圧力印加などがあり、試料の重水素化施設は中性子利用の特徴を生かすために重要である。

さらに、放射化試料の取り扱いには強い要望があり、放射化試料の中性子散乱測定が強く求められている。これは、一般ユーザーに限らず、中性子光学や検出器の耐放射線性評価や、原子力工学的材料評価など、原子力施設特有の重要項目であり、研究炉施設が持つべき機能である。

第2章

新試験研究炉に対する要望

中性子は、物質・生命科学における分子・原子レベルの構造・運動の解析や素粒子レベルの対称性といった基礎科学研究から、地球惑星科学、考古学、農業などの研究分野、そして産業に直結する素材・製品開発や工業製品の診断等々、広い分野にわたって重要な汎用的手段となっており、今後もその重要性は変わらない。中性子利用においては、中性子の強度が重要である。新試験研究炉は、熱出力の観点で見ると大型とは言えないかもしれないが、我が国の最新の炉設計技術と中性子測定基盤技術を動員して革新的なアイデアの結集を図り、中性子ビーム利用強度の増大を実現出来れば、中性子科学の世界的拠点として活躍できると見込まれる。そのためには、設計検討段階から研究コミュニティに開かれた推進体制を構築し、原子炉設計とビーム利用の緊密な協力が不可欠である。設計検討そのものに学術的意義を付与し、新試験研究炉設備の建設人材の育成に加えて、新試験研究炉ビーム施設運用時の利用人材の開拓、育成につながることを期待する。

2.1 中性子科学から見た新試験研究炉の意義づけ

1. 中性子供給の連続性

中性子ビーム需要は基礎研究から産業利用に広がっており、利用分野に限らず、中長期にわたる戦略的利用と短期の即時的利用の両方が求められている。そして、戦略的利用も短期利用の積み重ねになっている場合が多いので、理想的には、中性子の利用機会が常時確保されているべきである。さて、既存の汎用中性子施設である J-PARC MLF 及び JRR3 では、課題採択サイクルが半年または1年であり、またそれぞれ休止期間があり、常時利用可能とは言い難い。特に産業利用では、中性子需要の発生から、測定結果を開発あるいは生産現場に反映させるまでに許される時間が短いことが、中性子施設の運用サイクルに比べて短いことも多く、中性子を用いて得られる成果を活用できる場合が限定されやすい。新試験研究炉を既存中性子施設と相補的に運用して、中性子の常時利用に近づけることで、中性子利用者全般にわたって成果を生む効率が飛躍的に向上すると期待される。

また、時間的な相補性に加えて、空間的な相補性も重要である。J-PARC MLF、JRR3 はともに東日本の一ヶ所に集中しており、新試験研究炉が西日本に拠点を形成することには大きな意義がある。震災によって両者が同時に停止した結果、国内の中性子利用の完全停止を経験したことは記憶に新しい。中性子利用機会の空白期間を最小限に保つためにも、空間的に離れた複数拠点を持つことは極めて重要である。

2. 中性子利用の利便性と戦略的発展

中性子利用者は、まず中性子利用を着想し、実際に中性子を用いた計測を行い、計測結果を読み解いて成果に結びつける、という段階を経て、それぞれの課題解決に役立てる。その上で必要となる中性子利用の基礎知識が一般に共有されているとは言えない、という問題があるため、それを補助する人材の育成が永らく謳われ続けている。また、今後の需要を予測したり、新たな利用の開拓などの戦略を練る人材の育成も同様である。しかし、増加する需要に追いついていないというのが現状である。直接的な解決方法は、これらを担う人員数を増やすことである。しかし、単純に増加させるだけでは、急増する需要に追いつかない。そこで、中性子施設設計、中性子発生技術、中性子ビーム取り扱い技術、中性子散乱装置設計技術及び運用理念、計測技術及び解析などの基礎知識を体系化して、

人材育成の効率を根本的に向上させて解決を図ることが適当である。新試験研究炉はこれから建設を始める段階にあり、このような基本的戦略を確立する格好の現場となると期待できる。新試験研究炉の設計、建設、中性子利用設備整備などの作業も、体系化することで単なる作業を超えて、継承可能な知的財産になると考えられる。具体的には、この体系化された基礎知識を、研修のような形で学生、分野外研究者、産業分野の方々などが常時受講する機会を設けるなどして、間接的に中性子利用を担う人材の効率的増加を図ることが考えられる。その結果、一般利用者が中性子利用の可能性を理解できるようになり、中性子利用の新たな可能性が生まれていくことにつながると思われる。

同時に、中性子利用に付帯する技術を担う体制の整備が欠かせない。これには、中性子の光学、検出器、偏極などの技術開発体制、一般の試料作成や水素を含む試料の重水素化などの施設試料の準備施設、データ処理を担う計算科学を推進する体制などが考えられる。

さらに具体的に求められる利便性には、新試験研究炉へのアクセス及び滞在施設の整備に対する強い要求がある。今後の新幹線開業により敦賀駅までのアクセスは大いに改善されると期待されるが、敦賀駅と新試験研究炉の間の移動手段の拡充は欠かせない。また、新試験研究炉における宿泊施設・食堂・売店の整備も強く求められている。新試験研究炉の施設内においても、中性子実験装置へのアクセスを可能な限り便利にすることも欠かせない。特に 24 時間のアクセスを可能とすることは必須である。これらのアクセス性は、物質研究や産業利用などでは、施設利用を断念させかねない場合も予想され、本質的な問題である。

以上の活動全体はそれ自身に長期的な意義があり、今後の日本の中性子利用全般に役立つだけでなく、世界を牽引する重要な基礎となると見込まれる。そして、建設開始段階にこそ実現できる知的活動であり、新試験研究炉完成後の施設の意義を大きく左右すると考えられるので、中性子利用者との緊密な連携が強く求められる。

2.2 中性子科学会が考える基本方針

中性子施設の実験装置の陣容は、中性子利用施設としての性格を決定づける。そして、時代と共に変化する中性子需要に応じて、実験装置の陣容及び利用方法を刷新し続けることが不可欠である。実験装置の設計及び建設で育つ人材が、培われた知見を常に体系化して引き継いでいくことが求められる。そこで、基本方針を次の三つにまとめる。

2.2.1 優先 4 装置：基礎的な汎用測定を可能な限り早期に確実に実現

既存施設で培われた技術およびノウハウを最大限活用することで、開発にかかるオーバーヘッドを可能な限り削減することを考えたい。中性子科学において、分野をまたいで使用される基礎的な汎用装置は、(i) 小角散乱、(ii) 中性子イメージング、(iii) 中性子回折、(iv) 中性子反射率計と考えられ、この 4 装置を「優先装置」と呼ぶことにする。優先装置の中でも、特に (i) 小角散乱 と (ii) 中性子イメージングの優先度が高い。

一般に、装置性能を高めるためには、中性子ビームの利用方法に応じた原子炉設計が必要である。そして、最下流の測定装置特性までを含めた減速体設計、および減速体配置に整合した引出し光学系配置などは、施設全体の基本的性能を決定してしまうため、施設設計の段階から総合的な最適化を行う必要がある。

表 2.1 優先 4 装置と利用する中心波長帯

	FN FETN METN	NETN	TN	CN	VCN	UCN	備考
小角散乱 1				◎	◎		ガイドホールに設置
小角散乱 2			◎	◎	◎		ガイドホールに設置、放射化試料計測を含む
イメージング 1			◎				炉室に設置、放射化試料計測を含む
イメージング 2				◎			ガイドホールに設置
回折 1		◎	◎				炉室に設置、放射化試料計測を含む
回折 2			◎	◎			ガイドホールに設置、主に粉末回折
回折 3			◎	◎			ガイドホールに設置
反射 1				◎			ガイドホールに設置
反射 2				◎			放射化試料計測を含む

(I) 小角散乱

最初の一台としては、世界の最先端の「汎用」小角散乱装置と同等の性能を持つものを建設する。

中性子小角散乱装置 (SANS) の性能は炉心の中性子束にほぼ比例したものとなる。正確には、冷中性子減速材、ビーム輸送系の性能、装置設計に大きく依存する。最終的には入射中性子の角度分散を規定した上での、試料位置での入射中性子束に比例した性能となる。世界の主だった原子炉施設に設置された小角散乱装置の情報を表 1 にまとめた。これをまとめると単色中性子を用いた中性子小角散乱装置は多かれ少なかれ同じような性能を持っていることが分かる。

新試験研究炉に設置すべき SANS は今後、さまざまな議論を経て決まっていくものと思うが、その出発点として以下のような装置とする最初の案を提案する。

一般的に SANS の設計手順としては以下のように行う。それに対して新試験研究炉 SANS としての出発点の値を付け加えていく。

- 測定する Q レンジ、 Q_{\min} 、 Q_{\max} を決める。
ピンホール SANS としては $4 \times 10^{-3} < Q \text{ \AA}^{-1} < 0.7$ 程度が標準と思われる。
- 必要な ΔQ は Q_{\min} の数分の 1 とする。
- 試料の最大の大きさを決定する。通常は 20 mm 程度、最大 40 mm 程度である。
- 2 次元検出器の分解能は試料の大きさの数分の 1、大きさは分解能の 100 倍程度で選択する。
新試験研究炉の場合は長さ 1m、太さ 8mmφ の He-PSD を 120 本程度敷き詰めたものが第一候補となる。
- 主に使用する波長を決める。通常は 6-7Å とする。最大の波長は減速材、ビーム輸送系で決まり、30-40Å である。なるべく長いところまで測定できることが望ましい。最小の波長は結晶のブラッグ散乱を防ぐため、通常は 4Å 以上にとる。
- 試料環境に必要な大きさを決める。通常は資料を中心に半径 1 m 程度の場所を確保する。
- 試料-検出器間の距離は Q_{\min} 、 Q_{\max} 、波長とビーム発散角で決まるが、通常は 1.5 m 程度から 20 m 程度までとすることが多い。
 - － 福井炉の場合は最大は 20m 程度としたい。
 - － 最初はできる限り 1m に近く、散乱槽の中で検出器が置ける最短の距離とする。
 - － 検出器は任意の場所に置けることが望ましい。
 - － また最短距離では検出器の端にビーム中心が来て、最大の Q を測定できるよう、0.5m 程度横に移動できるの

が望ましいため、主の検出器とは別に、それより試料に近いところに High-Q 検出器を置けるようにしたい。0.5m × 1m 程度のもので 4 枚を左右、上下に障子のように移動できるようにしたものをも 3 セット程度置きたい。それぞればらばらに、試料から任意の距離、ビーム軸中心からの距離も任意にとれるように配置したい。この広角側の検出器についてはコストとの関係もあり、今後の概念設計で詰める必要がある。

- ガイド管の断面の大きさは通常の試料の大きさの 2 倍程度、この場合は 40mm 程度にとる。
 - － ガイド管のミラーは High-Q 側での強度を上げるために ^{58}Ni ミラーが望ましい。スーパーミラーは反射角が大きいところで反射率が低くなるためあまり望ましくない。
 - * ただし、その場合にはコリメータセクションよりも上流側のガイド管の断面の大きさは、ギャップがあるたびに上流側のガイド管の太さを太くする必要がある。0.5m のギャップで 10mm 程度増やすのが理想的である。よって上流のガイド管は断面の大きさを 50mm 角としたい。
 - * 上流のガイド管は S 字に曲げて高エネルギー中性子バックグラウンドを減少させる。これにより、試料位置でのビームの空間分布が平坦に近くなる。ただしこれはガイド管の遮蔽部分がかなり長くなることに注意が必要である。
 - － 試料のコリメーションを自在に変えられるよう、ガイド管を 2 m 毎に分割し、ガイドとコリメーションを交換できるようにする。
 - － さらに、磁気、あるいは物質中性子レンズとも交換できるようにしておく。
 - － コリメータセクションの上流端は試料から 20m とする。
- コリメータの上流に偏極子を、試料直前には ^3He ガス偏極フィルターを入れられるようにする。
- 試料環境としてはできれば連続的に試料を出し入れできるロボット式自動試料交換器、(-20°C から 200°C 程度の) 温度制御付き試料交換器が標準で必要である。その他に
 - － ゴニオメータ、
 - － 数 T の磁場をかけられる 0.5 K 程度で 5T 程度の磁場をかけられるクライオ磁石、50mK-7.5T のクライオ磁石、
 - － 1T の磁場をかけられる電磁石、
 - － 1K-400K 程度のクライオスタット、
 - － 1900°C 程度までの高温炉、
 - － 引張り試験機、
 - － Stopped-flow, Shear cell、
 等々が必要である。

表 2.2 に世界の代表的な小角散乱装置のパラメタを記述した。それぞれ、ほぼ同じようなデザインになっていることに注目してほしい。

また、表 2.3 に福井研究炉に設置する中性子小角散乱装置と国内の小角散乱装置との比較をまとめた。海外の代表的なものと比較すると、ガイド管の幅が 20 mm と、海外装置の 40 mm 程度の半分になっている他、試料と検出器間の距離が若干短くなっていることに注意して欲しい。

表 2.2 世界の代表的な小角散乱装置のパラメーター

	新試験研究炉 小角散乱装置 1	FRM-II sans-1	ANSTO quakka	ORNL GP-SANS	ILL D22 (Low q)	ILL D33 (TOF by a chop- per, High Flux)
Q range	0.004 < $\frac{Q}{1\text{\AA}^{-1}} < 0.7$ $Q_{\min} =$ $1 \times 10^{-4} \text{\AA}^{-1}$ (中性子レンズ + 高 分解能検出器)	$5 \times 10^4 <$ $Q/\text{\AA}^{-1} < 1$ $Q_{\min} =$ $1 \times 10^{-4} \text{\AA}^{-1}$ (with secondary high resolution detector)	$4 \times 10^{-3} <$ $Q/\text{\AA}^{-1} <$ 0.7 (4.75\AA) $8 \times 10^{-3} <$ $Q/\text{\AA}^{-1} <$ 0.2 (4.75\AA) $1 \times 10^{-3} <$ $Q/\text{\AA}^{-1} <$ 0.025 (12\AA)	$5 \times 10^2 <$ $Q/\text{\AA}^{-1} < 1$	$3 \times 10^4 <$ $Q/\text{\AA}^{-1} < 1$	$0.001 \text{\AA}^{-1} < 1$
Q_{\max}/Q_{\min} (one setting)	20				7	25 (モノクロ) >1000 (TOF)
with focusing lens optics for low Q	$6 \times 10^{-4} \text{\AA}^{-1}$		$6 \times 10^{-4} \text{\AA}^{-1}$			
sample size	20mm × 20mm					15mm × 15mm
velocity selector	$\Delta\lambda/\lambda = 0.1-0.2$ $\Delta\lambda/\lambda =$ 0.06-0.16 Trans. ~0.94	$\Delta\lambda/\lambda = 0.1-0.2$ $\Delta\lambda/\lambda =$ 0.06-0.16	$\Delta\lambda/\lambda =$ 0.07-0.18 $\Delta\lambda/\lambda =$ 0.04-0.14 Trans. ~0.94	$\Delta\lambda/\lambda =$ 0.09-0.25	$\Delta\lambda/\lambda = 0.1$ (standard) or $\Delta\lambda/\lambda = 0.2$	$\Delta\lambda/\lambda = 0.1$ (standard) $\Delta\lambda/\lambda =$ 0.02-0.26 (de- pending) on chopper pair & detector dista- nce)
Maximum flux						$4.1 \times$ $10^7 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Luminosity						$3.57 \times$ $10^{11} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$
Guide	40 mm V × 40 mm H S-shaped guide 50 mm V × 50 mm H ⁵⁸ Ni	50 mm × 50 mm S-shaped guide 50 mm V × 50 mm H (NL 4a)	50 mm × 50 mm ⁵⁸ Ni equivalent guides (4m, 7×2 m)	40 mm V × 40 mm H	50 mm V × 40 mm H	30 mm V × 30 mm H 4 × 2.5 m guides
pinhole collima- tor diameters	5, 10, 20, 30, 40 mm at 20.1m				variable aper- tures at 19.1m	5, 10, 20, 30, 40 mm, 30×50 mm (off-center)
collimator posi- tion	1.1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 20 m	1, 2, 4, 8, 16 m	1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 20 m	1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19 m	1.4, 2.0, 2.8, 4.0, 5.6, 8.0, 11.2, 14.4, 17.6, 19.1 m	2.8, 5.3, 7.8, 10.3, 12.8 m
sample-detector distance	1.3-20.1 m (continuously variable)		1.3-20.1 m (continuously variable)			
sample environ- ment space	≥ 2 m diameter					
sample environ- ment	sample changer, electromagnet, cryostat, cryo- magnet, furnace, stopped-flow, shear cell			automatic changers, fur- naces, magnets, cryostats, pres- sure cells, etc.		sample changer, electromagnet, cryostat, cryo- magnet, furnace, stopped-flow, shear cell
polarization	to be deter- mined. Two V-shaped polar- izers?	Two V-shaped polarizers	incident beam polarization (Fe:Si sm, RF spin flipper)			
sample area		0-35 mm diame- ter 0-50 mm diame- ter	Typical beam size 10 mm diameter up to 30 mm diameter Sample sup- port system AZ Systemes (x,y,z,θ,2-circle goniometer) maximum weight 1000 kg Maximum ver- tical distance from support system to beam height 500 mm			
detector	1 m ² array of 128 ³ He position sensitive tubes with 8 mm reso- lution Lateral detec- tor movement up to 0.5 m rate capability 2 MHz	1 m ² array of 128 ³ He position sensitive tubes with 8 mm reso- lution Lateral detec- tor movement up to 0.5 m rate capability 2 MHz	Area detector Horizontal offset 450 mm Active area: 1 m × 1 m Spatial resolu- tion: 5 mm × 5 mm	1 m wide array of 192 1-meter-long ³ He LPSDs 2 kHz/pixel, 2 MHz over the de- tector		640 mm × 640 mm 5 mm × 5 mm (128×128 pixels) 4 MHz (global) 3 kHz/pixel (lo- cal) 4 × 160 mm × 640 mm each panel

表 2.3 国内の小角散乱装置のパラメータ

	新試験研究炉 小角散乱装置 1	TAIKAN	SANS-J-II	PNO	SANS-U	IANS	KUMASANS
Basic type of instrument	Monochromatic SANS	TOF	Monochromatic SANS	Bonse-Hart type	Monochromatic SANS	TOF	Monochromatic SANS
Q range	$0.004 < \frac{Q}{1\text{\AA}^{-1}} < 0.7$ $Q_{\min} = 1 \times 10^{-4} \text{\AA}^{-1}$ (中性子レンズ + 高分解能検出器)	$7 \times 10^{-4} < Q/\text{\AA}^{-1} < 17$ (非偏極) $7 \times 10^{-4} < Q/\text{\AA}^{-1} < 2.5$ (偏極)	$3 \times 10^{-4} < Q/\text{\AA}^{-1} < 0.5$ (low-Q regime is covered by focusing SANS)	$2 \times 10^{-5} < Q/\text{\AA}^{-1} < 4 \times 10^{-3}$	$3.8 \times 10^{-4} < Q/\text{\AA}^{-1} < 0.35$ (low-Q regime is covered by focusing SANS)	$0.025 < Q/\text{\AA}^{-1} < 2$	$0.015 < Q/\text{\AA}^{-1} < 0.35$
Q_{\max}/Q_{\min} (one setting)	20	24000	20	20	20	80	23
with focusing lens optics for low Q	$6 \times 10^{-4} \text{\AA}^{-1}$		$3 \times 10^{-4} \text{\AA}^{-1}$		$3.8 \times 10^{-4} \text{\AA}^{-1}$		
sample size	$20\text{mm} \times 20\text{mm}$					$15\text{mm} \times 15\text{mm}$	
velocity selector	$\Delta\lambda/\lambda = 0.1-0.2$ $\Delta\lambda/\lambda = 0.06-0.16$ Trans. ~ 0.94		$\Delta\lambda/\lambda = 0.1-0.2$		$\Delta\lambda/\lambda = 0.08-0.2$		
Maximum flux Luminosity			$10^9 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$400 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$			
Wavelength range	4-40 \AA	0.8-7.8 \AA (非偏極) 2.5-7.8 \AA (偏極)	3-20 \AA	2 \AA	6-12 \AA	2-10 \AA	2.8 \AA, 4.4 \AA, 5.6 \AA
Guide	40 mm V \times 40 mm H S-shaped guide 50 mm V \times 50 mm H ^{58}Ni		20 mm V \times 50 mm H		20 mm V \times 50 mm H		
pinhole collimator diameters	5, 10, 20, 30, 40 mm at 20.1m				5 and 20 mm ϕ at 12 m 20 mm ϕ at 1, 4, 8, 16 m		
collimator position	1.1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 20 m		2-10 m		2, 4, 8, 12, 16 m	~ 0.5 m	
sample-detector distance	1.3-20.1 m (continuously variable)						
sample environment space	≥ 2 m diameter				60 cm diameter		
sample environment	sample changer, electromagnet, cryostat, cryomagnet, furnace, stopped-flow, shear cell	Sample changer, 3K/4K cryostat, 1Tesla magnet, 4Tesla cryo magnet, 10Tesla magnet, Rheometer, Stretching machine, gas absorption, laser heater	Sample changer 5, 10 Tesla magnet	Sample changer	Sample changer, Rheometer, Stretching machine, High pressure cell	temperature controller, 0.6 Tesla magnet	temperature controller, 0.5 Tesla magnet
polarization	to be determined. Two V-shaped polarizers?						
detector	1 m^2 array of 128 ^3He position sensitive tubes with 8 mm resolution Lateral detector movement up to 0.5 m rate capability 2 MHz		array of 96 ^3He position sensitive tubes, 0.6 m length with 8 mm diameter.		^3He detector $64.5 \times 64.5 \text{ cm}^2$, pixel: 128×128 resolution: $5 \times 5 \text{ mm}^2$	array of 16 ^3He position sensitive tubes, 0.6 m length with 12.6 mm diameter.	

(II) 中性子イメージング

1. 熱中性子イメージング装置のコンセプト

熱中性子イメージング装置においては、従来型の透過イメージングを実施することを主たる目的とする。また、中性子強度を重視し、短時間撮像、動画撮像などをターゲットとする。中性子束としては、JRR-3のイメージング装置 TNRF の中性子束 $10^8 \text{ ns}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 以上の $10^9 \text{ ns}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ を実現する。ビーム平行度 L/D については、高速性を重視する低 L/D (200 以下) から、数 $100 \mu\text{m}$ 以下の高空間分解能測定を実現する高 L/D (1000 以上) を選択できることが望ましい ($L/D=176$ @ JRR-3)。視野サイズは、工業製品のオペランド計測を可能とするために、A4 サイズ ($210 \times 297 \text{ mm}$) 以上が必要である。

また、比較的大きな工業製品 ($1 \text{ m}^3, 1 \text{ t}$ 程度) を測定できるように照射位置の空間を十分取り、試料へのアクセス、持込みのしやすさが重要である。さらに、水素など可燃性・支燃性ガスや大電力電源 (数 kW 以上) が利用できることも求められる。そのため、アクセスや測定への制限が余りきつくなければ炉室内への設置が良いが、制約の方が適しているが、最優先はビーム強度とする。

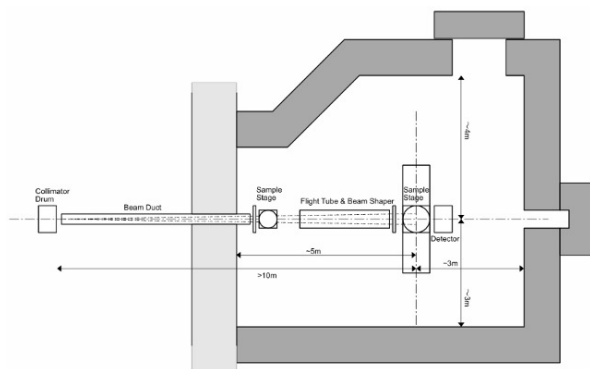


図 2.1 熱中性子イメージング装置のデザイン案

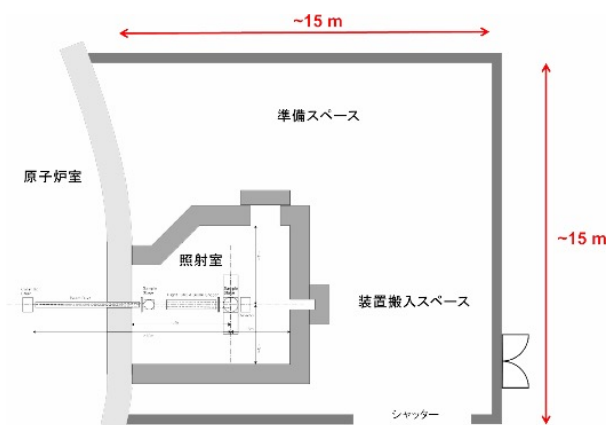


図 2.2 熱中性子イメージング装置における準備室案

2. 冷中性子イメージング装置のコンセプト

冷中性子イメージング装置は、数 μm 程度の高空間分解能イメージングおよび偏極中性子、中性子干渉を利用した特殊なイメージング手法の利用、新しい撮像技術の開発を目的とする。視野サイズは 200 mm 角程度、 L/D は $200 \sim 2000$ の範囲で可変とする。

中性子束は、最小 L/D 条件で $10^8 \text{ ns}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 程度、集光条件では $10^9 \text{ ns}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 以上が必要である。ピーク波長

については、0.3~0.4 nm 程度が望ましい。照射室は光学機器の設置のため、ビーム方向には 8m 以上の空間が必要であり、高さ方向には、低温実験や電磁石の設置を考慮して、ビーム高さに加えて 2 m 以上の空間が必要である。また、光学機器類を切替えるための自動架台など、様々な実験をフレキシブルに実施する環境を構築する。

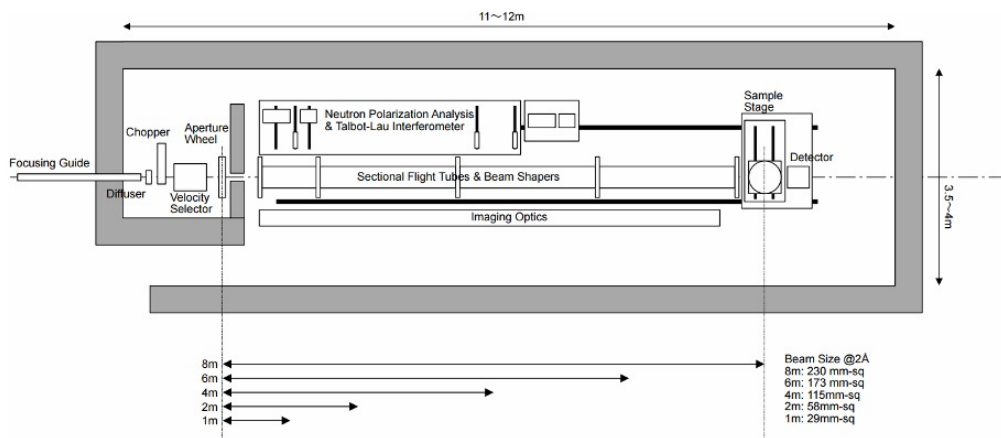


図 2.3 冷中性子イメージング装置のデザイン案

(III) 中性子回折

中性子回折装置には多種多様なバリエーションがある。大きくは、粉末試料等からの円環状に現れる中性子回折を効率よく測定する粉末回折装置、単結晶等の 3 次元波数空間にデルタ関数的に現れる回折を効率よく測定する単結晶回折装置と分けられるが、その中にも液体や非晶質、さらには結晶性物質中の短・中距離距離相関等を測定する全散乱装置や、残留応力・結晶配向の測定に特化した工学回折計等多種多様なバリエーションが考えられ、それぞれが独自の発展を遂げている。新型試験研究炉に最初に設置する回折計としてどのようなものが適当かは、新型試験研究炉の位置付けに基づき今後議論が行われると考えられるため、ここでは、代表的な 2 種類の回折計に望まれる装置パラメータを列記したい。この 2 種類の回折計の選び方は多分に偶発的であり、他の種類の回折計との優位性・必要性を基準としているわけではないことに注意されたい。

1. 粉末回折計

粉末回折計としては大きく分けて中程度の分解能で超高効率を目指すもの、高分解能を目指すものがある。また波長領域としては、主に磁性体の磁気構造解析を狙う超波長領域の回折計から液体・非晶質等の研究に用いられる短波長全散乱装置まで広く存在する。その中で、ここでは比較的一般的かと思われる。中波長領域の高効率回折計のパラメータを表 2.4 に示す。

このパラメータの実現例としては ANSTO に設置された WANBAT があげられる。この装置は大面積湾曲 2 次元検出器の採用により、粉末だけでなく（次に述べる）単結晶の測定にも使用できることが特徴である。また、Ge *hhl* 反射を適切に選択することにより、ある程度広い波長範囲の中性子を取り出すことができるため、長波長（例えば 2.44 Å）が必要な磁性研究から比較的短い波長（例えば 1.3 Å）が必要な結晶構造研究まで多岐にわたって使用可能である。なお、参考にした WANBAT 自体は高効率に特化した装置であるが、適当なコリメータを挿入することにより、比較的高分解能な測定条件も達成可能である。また検出器縦方向角度範囲を大きく取り、かつ入射波長をより短波長側に振ることができれば、液体・非晶質測定にも使用されることが期待される。

2. 単結晶回折計

単結晶回折計としては、結晶・磁気構造解析だけを考えても、波数空間を一点一点測定する比較的小規模な 4 軸回折計、大面積検出器を用いて一度に広い波数空間を測定する回折計、さらには準白色中性子を使用する

表 2.4 高効率粉末回折計のスペック

設置ビームポート	熱中性子ガイド、もしくは炉室 (熱中性子)
モノクロメーター	PG(002) ※縦方向ベントモノクロメーターとする Ge(<i>hhl</i>) ※縦方向ベントモノクロメーターとする
モノクロメーター取出角範囲	40 ~ 140 度
検出器	1 次元もしくは 2 次元湾曲位置敏感型検出器
検出器角度範囲	0 ~ 160 度 (水平面内)
サンプル位置フラックス	1×10^8 n/cm ² /s (PG002 使用時、最高強度条件で)
コリメーション (入射側)	Open, 10'
コリメーション (検出器側)	Radial (30'), Radial 10'

表 2.5 高効率単結晶回折計のスペック

設置ビームポート	熱中性子ガイド、もしくは炉室 (熱中性子)
モノクロメーター	PG(002) ※縦方向可変モノクロメーターとする Ge(<i>hhl</i>) ※縦方向可変モノクロメーターとする Cu(<i>hhl</i>) ※フラットモノクロメーターとする Si(<i>hhl</i>) ※ダブルフォーカスモノクロメーターとする
モノクロメーター取出角範囲	40 ~ 90 度
サンプル位置フラックス	1×10^8 n/cm ² /s (PG002 使用時、最高強度条件で)
検出器 1	2 次元湾曲位置敏感型検出器
検出器角度範囲	0 ~ 120 度 (水平面内)
検出器角度範囲	-15 ~ 15 度 (鉛直面内)
コリメーション (入射側)	Open (Natural)
コリメーション (検出器側)	Open (Natural)
検出器 2	0 次元 ³ He 検出器もしくは小型 2 次元位置敏感型検出器
コリメーション (入射側)	Open (Natural)
コリメーション (検出器側)	Open (Natural)
サンプル回転	full χ circle
オプション	極端環境 (強磁場、極低温、超高温、超高压) 偏極中性子オプション

中性子ラウエカメラ等、複数の原理が存在し、それぞれ一長一短がある。これに加え、残留応力や結晶配向等の工学用途に向けた測定装置も考えられる。したがって、新型試験研究炉における回折装置として単結晶回折計を選択する場合、さらにこのような目的に関する議論が必要である。そのような観点はさておき、以下には単結晶回折計の一例として表 2.5 に 0 次元検出器および大面積湾曲 2 次元位置敏感型検出器を両者備えた単結晶回折計のパラメータを示す。

このような単結晶回折計としては ILL に設置された D19 があげられる。大面積 2 次元検出器の採用により 1000 から 100000 Å³ 程度の単位胞体積を持つ物質群の構造解析に非常に有効に使用できる。同時に多数のモノクロメータを設置することである程度広い波長範囲が得られるため、長波長領域での磁気構造解析等にも有効に利用できるであろう。また、単色中性子を使用する分光器であり、かつ試料周辺の自由度も大きいため、偏極中性子オプションや極端環境 (磁場、低温、高温、高压) が比較的容易に導入できることもこのタイプの装置の優位性であると

考えられる。一方、極めて高い測定精度を求める目的にはコンベンショナルな 0 次元装置の要望も大きい。このタイプの装置としては ORNL HFIR に設置された HB-3A や、JRR-3 に設置された FONDER があげられる。このタイプの装置は、大面積 2 次元検出器を取り外し、 2θ アームと 0 次元（もしくは小型の 2 次元）検出器を取り付けることにより実現できると考えられるため、そのようなオプション（検出器 2）を準備するのが得策と考えられる。

(IV) 中性子反射率計

中性子反射率計は、中性子が示す反射や屈折といった光学的な特性を利用して、物質の表面・界面や薄膜の構造を試料深さ方向にサブ nm スケールの高い空間分解能かつ非破壊で調べられる測定手法である。現在、国内でユーザー利用のために稼働している反射率計は、J-PARC のパルス中性子源に設置された SOFIA (BL16) および SHARAKU (BL17) と、JRR-3 研究用原子炉の SUIREN である。これらの中では、唯一、SOFIA が試料水平型の反射率計である。

新試験研究炉において優先して設置されるべきは、汎用性が高く早期に成果の創出が見込まれる試料水型の反射率計である。試料水平型を採用することで、試料垂直型では対応できない自由界面（液体表面）をはじめとして、多様な試料界面の測定に対応することができる。また、界面のオペランド計測を考えると、原子炉に設置された一般的な反射率計で採用されている一定波長の中性子を使った角度分散型より、チョッパーを用いて白色中性子を作り出し、波長分散型の装置が有利である。試料水平型の装置では、自由界面を傾けられないことから、下方にビームを取り出す必要がある。従前の試料水平型の反射率計は、初めから中性子の下方取り出しが想定されることが少なかったため、可能ならば、試料水平型に最適な下方ビーム取り出しを設計に考慮できることが望ましい。

この試料水平型の装置で研究を展開しつつ、次の段階で試料垂直型の装置を設置する。試料垂直型の反射率計でも、自由界面以外の測定に対応できることと、こちらに偏極モードを導入することで、磁気薄膜の研究を展開できるようにする。

2.2.2 拠点形成と人材育成

新試験研究炉は、西日本における中性子研究および産業利用の拠点として機能することを求める。デバイス設計開発、装置設計建設に携わる技術者及び研究者を育成することから始めて、中性子利用全体の俯瞰的那智県に基づいて具体的な中性子実験装置の整備を牽引したり、次世代研究用原子炉の企画などの長期戦略に結びつけることを目指したい。特に若手研究者を育成することを想定し、量子ビーム科学の将来を切り拓く優種な人材を育む体制を用意することが肝要である。そこで、量子ビーム科学の普及を目的として、中性子利用の基礎知識を体系化し、またそれを研究会や研修などの形で継続的に発展させる研修センターを早急に設置することが望まれる。また、先端研究の知見を常に取り込むための専任顧問（仮称）を置く必要があると考えられる。

2.2.3 新技術・新発想の世界最先端拠点の形成

(A) 中性子光学

中性子光学、中性子検出器、中性子偏極、信号処理、データ解析などの基盤技術は、中性子利用を支えるという側面と、新たな中性子利用方法を開拓し、新たな研究分野の形成につながる。

新試験研究炉に直結するものとして、線源近傍まで導入可能な金属基板多層膜スーパーミラーの導入、中性子偏極技術、集光型小角散乱によるコンパクトな装置設計などが挙げられる。多層膜積層技術の革新は中性子利用効率を飛躍的に向上させる可能性を持っているので、特に重要である。現在は実用的に用いることができるスーパーミラーの m 値は概ね $m \leq 5$ の範囲であるが、 $m \leq 10$ 程度までの技術革新は始まっている^{*1}。これは冷中性子や極冷中性子の取り込み立格を劇的に増大するとともに、近熱外中性子の輸送光学を開拓するものである。さらに、電磁的中性子光学などの先進的光学系による低損失輸送やビームパルス化、中性子スピン偏極・スピン輸送および解

*1 スーパーミラーの m 値は、スーパーミラーの最大反射角を、自然同位体比ニッケル表面の反射臨界角を単位として表したものである

析、核偏極試料、などの技術革新が考えられる。

(B) 中性子利用

高度な偏極および検出技術の開発および実証など、設計方法のパラダイムシフトをもたらす研究を推進する。その成果は中性子施設ネットワークを通じて全国あるいは全世界の中性子施設において展開する。これによって、新試験研究炉が新技術・新発想の発信拠点という立ち位置を得る。ビームライン上では試料環境や試料交換自動化、信号処理およびリアルタイムデータ解析などの高度化が挙げられ、ビームライン外で試料調整設備、試料重水素化、さらに中性子照射試料に対して中性子散乱測定を実行できるようなホットラボなどは建設段階から検討が必要である。

(C) 測定装置の拡充

優先装置以外にも必要性が高い測定装置は多数あり、初期段階から検討する必要がある。これらは、熱及び冷中性子以外の波長帯を用いる場合が含まれる。

(D) 学術的拠点形成

さまざまな研究及び利用方法の側面に焦点を当て、それぞれについての学術的拠点の形成を推進する。例としては、オペランド計測を軸とした研究センター、生命科学を軸とした研究センター、情報科学との融合を軸とした研究センターなどが考えられる。

2.2.4 実施の時系列

これらのうち(2.2.1)を最優先で実行し、それと並行して(2.2.2)を開始し、それらの基礎の上に(2.2.3)を実行することを提案する。ただし、(2.2.3)の実行にあたっては、(2.2.1)及び(2.2.2)と双方向の緊密な連携が欠かせないため、これらは詳細設計時に同時並行的に推進されることが必要である。

2.3 優先 4 装置以外の重要事項

優先 4 装置は、代表的な汎用装置であり、ビーム需要を早期に満たすことに重点が置かれる。しかし、それと並行して推進すべき装置、中性子ビーム、開発施設などを整備する必要がある。ビーム需要を満たすという意義に加えて、国際的にも学術的な先進性を先取りすることになるような場合が多い。また先進性を支える先進的技術開発や方法論の抜本的改良などを伴うので、そのような基礎研究そのものにも先進性が伴う。

物性研究を進める上では中性子非弾性散乱を測定する装置を配備することが必要であり、基礎物理を進めるためには、超冷中性子、極冷中性子、近熱外中性子、照射設備が必要である。また、研究の進展に応じて、速・熱外中性子ビームが必要になる。超冷中性子源の配置例を図 2.4 に示す。超冷中性子は、冷中性子減速体で発生する極冷中性子を減速することで得る。冷中性子減速体に可能な限り接近したところまで極冷中性子輸送光学系を挿入して、極冷中性子を取り出す。極冷中性子の引き出し方向に制限は特になく、冷中性子ガイドと同じ平面にある必要もない。極冷中性子は斜めに取り出した上で水平方向に打ち返すことも可能で、図 2.5 のようにすれば、極冷中性子を取り出し方向がガイドホールに向かう冷中性子ガイドの方向に近くとも、幾何学的に抵触しないようにできる。このような取り出し方は、冷中性子に対しても適用可能であり、冷中性子導管を倍増することも可能である。ただし、冷中性子ビームの水平への打ち返しの最大角は、極冷中性子ビームに比べると小さい。また、速中性子を取り出し方向にも任意性があり、図 2.5 のようにした方向に取り出せば、速中性子を取り出すことで追加的に必要となる遮蔽体を低減することができる。

このような配置を実現するためには、中性子光学開発施設の整備が必要である。中性子光学の高度化は、中性子ビーム利用全般にわたって利用効率を向上させるために必須の重要事項である。

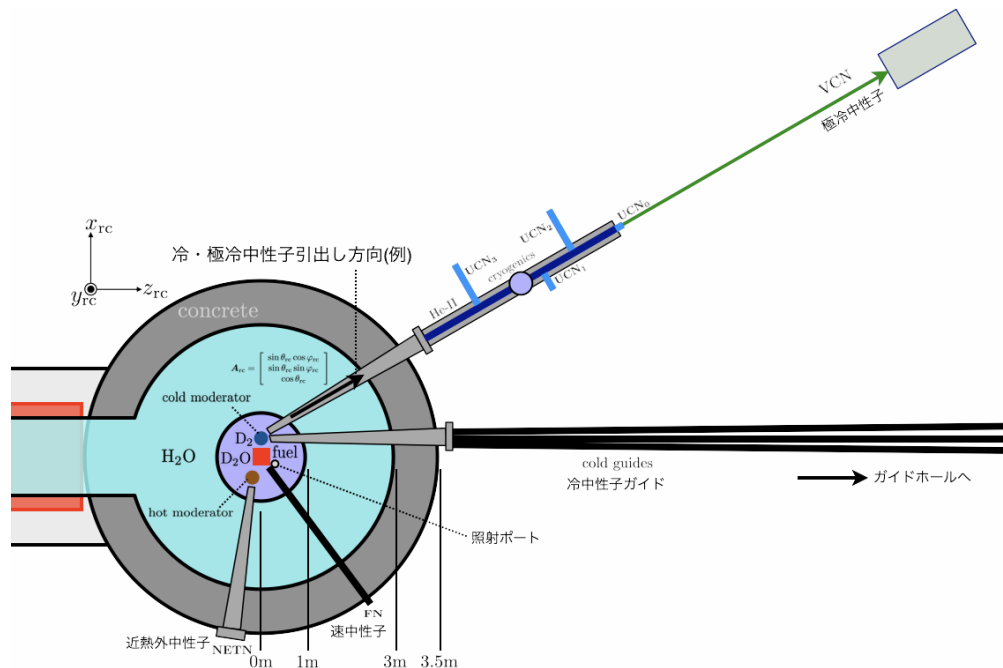


図 2.4 炉心周辺の配置例 (上面図)。極冷中性子の取り出し方向は、この図の面上において任意である。この図では、ガイドホールに向かう冷中性子ガイドの方向と抵触しないように描いてある。図の面に垂直な方向については、水平に取り出すことが一般的であろうが、図 2.5 に示すとおり斜めに取り出すことも可能であり、斜め上方に取り出せば図の面上では冷中性子ガイドと同じ方向に配置することが可能である。

熱外中性子の取り出し方向は、この図の面上では任意だが、面に垂直な方向については水平であることが必要である。速中性子の取り出し方向は任意である。

2.3.1 非弾性散乱装置 (準弾性散乱装置を含む)

原子、分子、スピンの動的相関を直接観測する中性子非弾性散乱実験は、中性子散乱が他の測定手段に対して得意とするところのものであり、特に、偏極中性子と組み合わせた場合、追従する他の手法のない強力な測定手法である。また、原子炉定常中性子源に設置される非弾性散乱装置の典型である三軸分光器は、散乱に寄与する中性子の波数ベクトルが単純かつ目に見えやすい形で決定されるため、教育にも優れているとされる。そのため、新試験研究炉においても、非弾性散乱実験装置の設置を検討することは重要である。一般に、非弾性散乱の観測には十分な中性子束が必要とされ、新試験研究炉は、熱出力についての制限、それに伴う線束の制限がある。それでも教育用や、そのみならず、一定の成果が見込める装置の設置は容易であり、さらには、近年の内外の非弾性散乱装置に採用されている様々な工夫や線源の最適化などを図れば、世界最先端の成果が得られる先鋭的な装置の実現も可能である。一方で、JRR-3 には多数の三軸型分光器が設置されており、J-PARC にも高性能の非弾性散乱装置が存在する。そのため、新試験研究炉に設置する非弾性散乱装置は、それらとのバランスや棲み分けを考慮した戦略が必要となる。

固体物性 (磁性・強相関係、固体物理)

節 1.2.1 にも述べたように、固体物性研究において中性子非弾性散乱実験、準弾性散乱実験は、この分野の研究においては中性子散乱研究手法が最も活躍する非常に重要な測定手段となっており、それを実現する装置の需要は大きい。固体物性分野の調査でも、量子スピン系における新奇現象の解明から熱電材料、電池材料など新たな機能性材料の機能解明に至るまで、具体的な測定についての多くの需要と様々なタイプの中性子非弾性散乱・準弾性散乱装置の要望が伺える。この分野において求められるのは、格子やスピンの集団励起や局所揺らぎそれらの干渉によって生じる新たな素励起の観測であり、そのためには、冷中性子から熱外中性子領域までにおいて広い範囲のエネルギー (0.1-100 meV)、移行運動量範囲

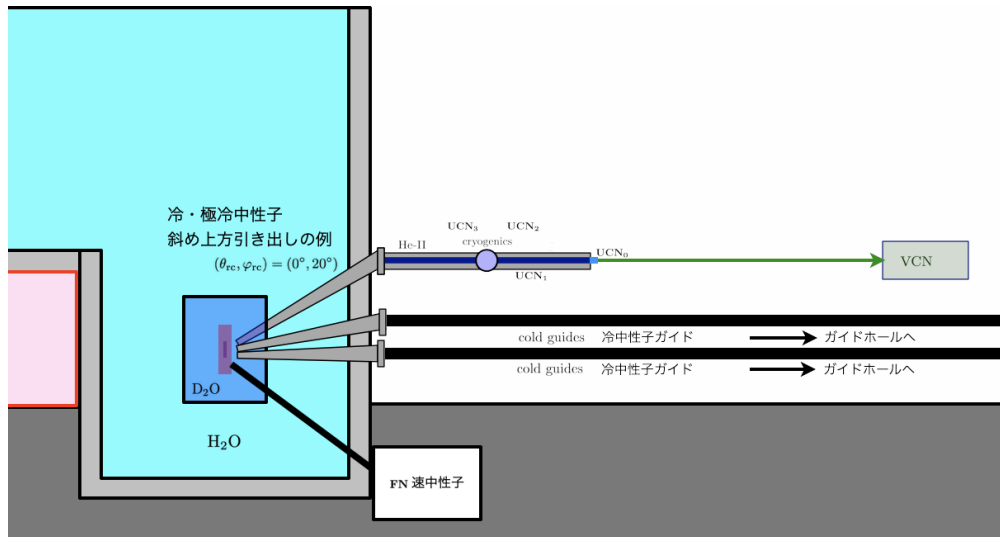


図 2.5 極冷中性子を斜め上方に取り出した場合の側面図

($0.01\text{-}0.5\text{ nm}^{-1}$) の散乱関数を精密、かつ、効率よく測定できる装置が必要となる。そのため、内外の中性子施設では多くの三軸型分光器分光器、直接配置型分光器等が稼働している。さらには、 μeV 領域の低エネルギー、高エネルギー分解能の分光器にも一定の需要があり、後方散乱型の非弾性散乱装置やスピネコー装置が用いられている。新試験研究炉においては、この領域の中で、J-PARC や JRR-3 等の既存装置とのバランスを考えた上で、実施可能で多くの需要がある領域冷中性子から熱中性子領域 ($0.1\text{-}50\text{ meV}$) をカバーする汎用性の高い中分解能の装置がよいと考えられる。これは、三軸分光器やそれらを高度化したものによって賄うことが可能であろう。また、合わせて、この分野において中性子非弾性散乱が強力な研究手段となっていることを鑑み、この分野の研究者の育成のために、気軽に実験手法を体験し、訓練を受けることのできる教育用非弾性散乱装置の需要もある。そのためには、ガイドホールのようなアクセスの容易な場所に三軸分光器を設置するのがよいと考えられる。

非弾性散乱装置のビーム需要

冷、熱中性子領域の非弾性散乱装置について、J-PARC のチョッパー型分光器の課題申請の競争率は 2~4 倍程度であるとされている。固体物性研究に必要な冷、熱中性子領域の非弾性散乱装置のビームタイムは全く需要が満たせていない状態であると言える。一方、JRR-3 で三軸分光器を運用する東京大学、JAEA の装置担当者への聞き取りによると、現状、JRR-3 に設置された三軸型分光器の課題採択率は、1 倍程度とのことであった。そのような中で、J-PARC、JRR-3 が将来安定的に稼働を続けた場合の需要予測は、J-PARC のチョッパー型分光器の課題をどれくらい受け止められるかにかかる。J-PARC を代替するには、そこで行われている直接配置型分光器で広い E-Q 空間を一挙にカバーするという需要をまかなう装置を考慮する必要がある。そのような装置を設置した場合、J-PARC のチョッパー型分光器で溢れている課題の大きな部分を引き受け、試料環境の極端条件、偏極等の充実で、さらにそれらのうちの良質な課題を取り込むことができる可能性がある。J-PARC のみ稼働し、JRR-3 が停止した場合には、JRR-3 の三軸分光器のユーザー層が加わる。JRR-3 のみ稼働の場合には、広い E-Q 空間を一挙にカバーする需要を受け入れることがより重要になり、J-PARC の膨大な需要をどれだけ取り込めるかは、装置設計の妙にかかってくることになる。

より低エネルギー領域の非弾性散乱、準弾性散乱装置については、例えば、J-PARC の DNA は、常に 2 倍程度以上の申請課題の競争率があり、一定の需要はある。この領域では、準弾性散乱や EISF を測る事になる。準弾性散乱測定が固体物理で行われることはそれほど多くないため、現時点で固体物理分野のユーザーは少なく、将来の需要の動向の定量的予測は困難である。その上で、あえて将来予測を考えると次のようになる。

1. J-PARC、JRR-3 が将来安定的に稼働を続けた場合

既存装置の補完的な利用者が見込まれる。現在、J-PARC や JRR-3 でその領域の装置を運用している担当者は、

表 2.6 大強度熱中性子三軸分光器の主なスペック

設置ビームポート	炉室 (熱中性子)
モノクロメーター	PG(002) Heusler(111) ※ダブルベントモノクロメーターとする以下オプションとして Cu(220) Cu(111) Ge(311)
アナライザー PG(002)	Heusler(111) ※ダブルベントアナライザーとする 以下オプションとして Ge(311)
測定エネルギー遷移	1 – 100 meV
エネルギー分解能	E_i に対して 5% 程度
測定運動量遷移上限	$> 120\text{nm}^{-1}$
運動量遷移分解能	k_i に対して 0.2%~ 数 %
その他	偏極中性子解析を運用するための装備 分光器の非磁性化 マルチアナライザー化の検討要

DNA に一定の固体物理ユーザーがいること、J-PARC のチョッパー型分光器は 1meV 以下の測定に困難があることなどから、適切な装置を設置し、掘り起こした場合需要が生まれる可能性があるだろうと予測している。

2. J-PARC のみ稼働した場合

現在、JRR-3 の AGNES が固体物理ユーザーをほとんど抱えていない状況なので、J-PARC、JRR-3 が将来安定的に稼働した場合と状況に変化はない。

3. JRR-3 のみ稼働の場合

DNA の持つ固体物理ユーザーやチョッパー型分光器で低エネルギーの測定を行いたいユーザーが流れこむ可能性はある。いずれにしろ、固体物理研究の分野では、この領域の装置は高い優先順位のものではない。一方で、1meV 以下の低エネルギー領域の非弾性散乱測定に J-PARC のチョッパー型分光器ではカバーしきれない一定の需要があることは留意すべきである。

非弾性散乱装置のコンセプト

以上のような需要から、以下のような 3 種類の非弾性散乱の設置を提案する。

(非弾性散乱装置 1): 大強度熱中性子三軸分光器

大強度が見込める炉室内に設置し、熱中性子領域の非弾性散乱を大強度で実施する三軸型分光器。大面積のビーム孔入り口 ($\sim 200\text{cm}^2$ 程度) を持ち、そこで取り込んだ中性子をスーパーミラーでバーチャルソース位置で収束させたあと、ダブルベントモノクロメーターを介して、大強度中性子を試料位置に集光し、真空化されたアナライザー、検出器モジュールで散乱中性子を分析する。欧州の最先端の三軸型分光器と同等かそれ以上の性能を持つ分光器。

その例として、FRM-II に設置した PUMA が参考となる。この PUMA に対して、実際の装置建設時期まで利用可能な最新の技術も投入し、偏極中性子の利用、マルチアナライザー化の検討なども加えるべき。

中性子束としては、現行の 3 号炉の炉室に設置された中性子分光器の一桁上の強度を試料位置で実現することを目指す。バーチャルソースジオメトリーをこの分光器で用いるだけで線源から試料位置まで現行の 3 号炉の炉室に設置された

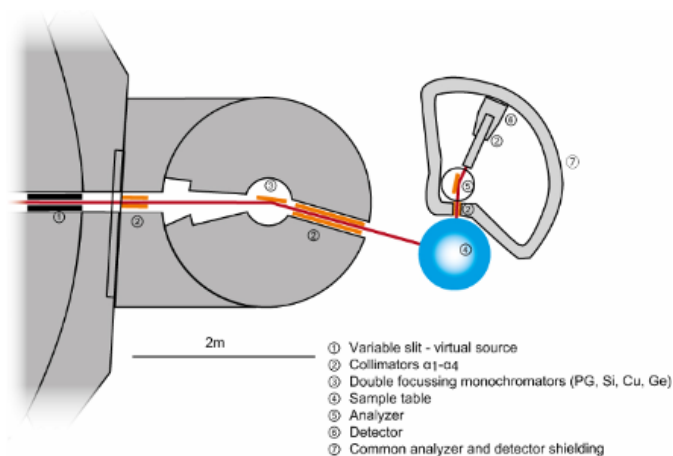


図 2.6 大強度熱中性子三軸型分光器の例となる FRM-II に設置された PUMA (O. Sobolev et al., JLSRF, 1, A13 (2015) (<http://dx.doi.org/10.17815/jlsrf-1-36>))

中性子分光器の 1 桁以上の輸送効率を持つことができると考える。その他、モノクロメーター以下の光学系の最適化で、線源の強度が JRR-3 よりも小さいことを相殺し、世界標準レベルの性能を得られると考えられる。これにより、目的とする J-PARC の非弾性散乱装置群と肩を並べ、あるいは偏極実験や極端条件の試料環境装置の充実でそれを超え、世界最先端の物質科学研究を実施することを実現する。

(非弾性散乱装置 2): 大強度冷中性子三軸分光器

冷中性子源からの見込みを大立体角で占有し、 $10^{-2} \sim 10$ meV 領域の非弾性散乱を高強度、高分解能で測定する装置。この領域の三軸分光器は、国内外の最新装置ではマルチアナライザー型が登場し、それらのうち稼働中の装置では大きな成果を上げていることから、マルチアナライザー型とすべき。具体的には、NIST の冷中性子源に設置されて、量子スピンの研究で大きな成果を上げている MACS を参考とした装置を設置するのが良いと思われる。

このタイプの装置では性能を決めるのは一定の見込み立体角で占有することのできる冷中性子源である。冷中性子源からの中性子を位相空間における無駄のない範囲で大面積で取り出し、試料位置まで導くことで、高強度を実現する。長波長領域であることを利用して、中性子光学素子を最大限に利用する。もちろん、モノクロメーターはこれに見合う大面積のダブルベント型として、モノクロメーターから試料間も集光ミラーによる収束を行う。アナライザーは、マルチアナライザーとする。MACS ではダブルアナライザーによるジオメトリーを採用しているが、現在、東京大学物性研究所が建設を進めている IRIS 型も可能性としてはある。一方、偏極中性子も扱えるようにするべきであるが、その方法については要検討である。

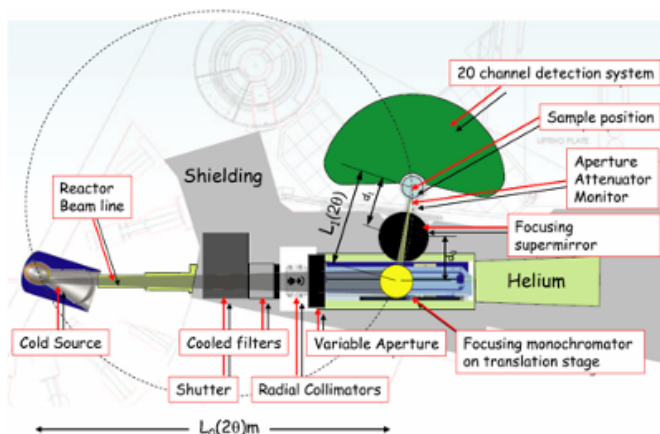


図 2.7 NIST に設置された MACS 分光器 (J. A. Rodoriguez et al., Meas. Sci. Technol. 19 034023 (2008).)

表 2.7 大強度冷中性子三軸分光器

設置ビームポート	炉室またはガイドホール (冷中性子) 冷中性子原を大見込み角で占有すること
モノクロメーター	PG(002) ※ダブルベントモノクロメーターとする
アナライザー	PG(002) ※ダブルベントアナライザーとする ※マルチアナライザーとする
測定エネルギー遷移	0.1 – 10 meV
エネルギー分解能	E_i に対して 5% 程度
測定運動量遷移上限	$> 50\text{nm}^{-1}$
運動量遷移分解能	k_i に対して数 % 以上
その他	偏極中性子解析を運用するための装備 分光器の非磁性化

この分野の利用分野、将来の需要予測から、強度、エネルギー分解能については、J-PARC に設置された冷中性子チョッパ型分光器に迫る性能を狙う必要がある。これは、Q 分解能を犠牲にすることで実現できる可能性がある。また、全体を非磁性化することで、J-PARC では利用できない高磁場を発生するマグネットの利用など、試料周辺機器の充実も必須である。

(非弾性散乱装置 3): 教育用三軸分光器

この分野の研究者の育成のために、気軽に実験手法を体験し、中性子実験測定の訓練を受けることのできる教育用非弾性散乱装置。高いスペックは求めず、簡便単純な構造と取り扱いやすさ、教育のため各コンポーネントに容易にアクセスできる構造とすること等を考慮する。保守の容易さを備え、低価格で設置でき、気軽に使える装置。教育用と呼ぶが、簡単な非弾性散乱実験や回折実験なら実施でき、十分実用に耐えるものである。

分光器の建設設置にあたっては、JRR-3 に設置された T1-1 や C1-1 等がこれに該当する。JRR-3 や他の原子炉で使用された装置の中古品を移設してもよい。また、簡単な装置なので、地元の学生や地元の製造会社によって地元三軸を作り、中性子利用のアウトリーチ活動と連結させる事も考えられる。

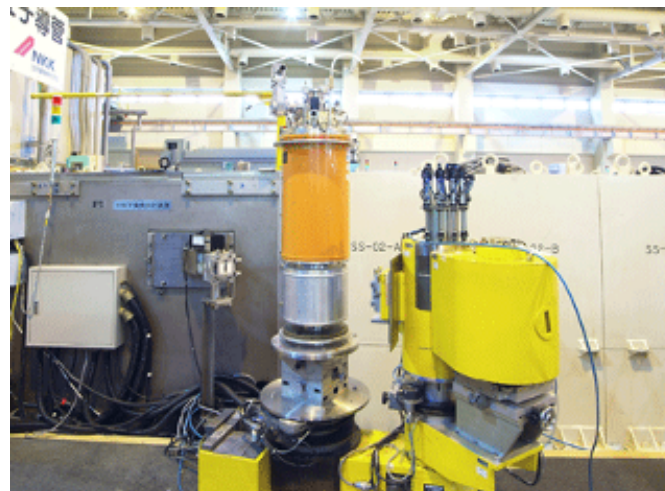


図 2.8 JRR-3 のガイドホールに設置された T1-1。

表 2.8 教育用三軸分光器

設置ビームポート	ガイドホール 熱、冷、どちらでもよい 空いている場所を使うこと
モノクロメーター	PG(002)
アナライザー	PG(002)
測定エネルギー遷移	1 – 30 meV
エネルギー分解能	E_i に対して 5-10% 程度
測定運動量遷移上限	$> 50\text{nm}^{-1}$ あれば十分であろう
運動量遷移分解能	k_i に対して 0. 数 % ~ 数 %
その他	取り扱いやすさ 各コンポーネントへのアクセス できるだけコンパクトな構造

2.3.2 弾性散乱装置（特に単結晶回折計および散漫散乱装置）

固体物性の観点からは、回折（弾性散乱）実験には大きな需要がある。優先 4 装置に回折計が挙げられているが、固体物理需要は到底一台の装置で賄えるものではない。本節では、（優先 4 装置と多少重複するが）新型試験研究炉が有すべき回折計、さらにはそれに付帯すべき試料環境等をまとめる。

固体物性における近年の具体的な研究例としては誘電体やマルチフェロイック物質・トポロジカル物質等の高精度結晶・磁気構造解析が本質的に重要な研究、トポロジカル物質や超伝導物質と磁性体との界面研究、van der Waals 物質等原子層物質の研究、スキルミオンに代表される大きな構造（スピントクスチャー）の研究、さらには乱れた構造・磁性体における短距離原子・磁気構造の研究等が挙げられる。これらの研究には狭義の構造解析装置（4 軸回折計等の単結晶構造解析装置）のみならず、粉末回折計、反射率計、小角散乱装置、散漫散乱装置等が必要となる。以下では結晶・磁気構造解析装置および散漫散乱装置に関して記すが、他の装置の重要性が低い訳ではないことを特記する。

単結晶回折計に関しては、比較的長い波長の回折計と短い波長の high-Q 装置の 2 台の装置が必要であり、長波長領域の回折計では磁性研究のために偏極中性子が利用可能であることも求められる。現在、JRR-3、J-PARC 共に、磁性研究の需要を満足させる性能を持つ上記のような装置はない。FONDER、SENJU については、偏極中性子を利用する能力がなく、この部分の需要は偏極三軸分光器を二軸回折計としての利用へ流れている。

さらに、散漫散乱装置については、現在 reverse Monte Carlo 等の数値解析手法の進展が急激であり、さらに新しい数学手法の進展も予想されるため、福井炉ができる頃にはかなり実用的になると想像される。従って、この様な分野に多くのユーザーが生み出される可能性がある。

SENJU の実験の半数程度はマグネット、希釈冷凍機、2K 冷凍機等の低温・磁場環境下のものである。この需要に応えるためには福井の回折計にそのような試料環境が重要である。また、この分野の装置もまた解析を含めたユーザビリティが非常に重要であり、中性子プロパーで無い研究者でもすぐに解析できるようなソフトウェア開発、さらにはリモート解析ができる計算機環境の整備等が必要である。ソフトウェア開発に関しては海外との開発協力を考慮すべきである。ソフトウェアの共通化、時分割測定における有用性などの観点から、原子炉のデータ取得に関してもイベント化するのが適当であり、国内だけでなく世界的にデータフォーマットを統一すべきである。また、需要予測に合わせた装置の検討だけではなく、需要発掘も重要である。

単結晶回折計のビーム需要

J-PARC/MLF の SENJU の競争率は非常に高く国内で実施できていない実験は多くある。また、JRR-3 5G (PONTA)

にも偏極回折実験の申請が多くくる。したがって現状でも単結晶回折実験（含む偏極磁気構造解析実験）の需要は大きい。さらに、現在国内で不可能な短波長精密高分解能構造解析や長波長での磁気構造解析専用装置等は新しいユーザーを発掘する可能性が高い。また、物性研究者には完全な構造解析を目指すのではなく、バルク情報では得られない最後の情報を得たいだけ、という需要が多い。その意味でも偏極回折等が必要に応じて可能なことは重要である。散漫散乱測定についても、先に述べたように今後も多くのユーザーが生み出される可能性がある。

現在の需要としては、FONDER については、年間 15 課題程度であり、国内に 15 ほどのグループがある（約 8 割は大学所属）。SENJU は、年間 40 課題程度の応募があり、競争率は 2-3 倍（年によっては 4 倍弱）の中で、10 強程度のグループ（ほぼ大学）が常時申請を行っている。

新たな原子炉に単結晶回折計が設置された場合の需要としては以下のように考えられる。：

- J-PARC, JRR-3 共に稼働状態の場合
SENJU で実施できていない課題のうち福井でできるものが申請される。おおよそ、10 件以上と見込まれる。
- J-PARC のみ稼働状態の場合
上記に加えて FONDER の課題が流入する。結果、おおよそ、20 件以上に達すると見込まれる。
- JRR-3 のみ稼働状態の場合
現在の SENJU の課題のうち福井でできるものとして、20 件程度が流入すると考えられる。

ただし、これらの予測は、現在の需要がそのまま続くという考えのものであり、新たな回折計における強磁場・極低温試料環境の充実、並びに新たな需要発掘を行うことで、需要は大幅に増すことが考えられる。また、CSNS で単結晶回折計ができれば SENJU の状況は少し変わる可能性はある（現在 SENJU の中国からのユーザー比率として 1/4 程度を占める）。

単結晶回折計のコンセプト

結晶構造解析の実空間分解能を追求するという意味ではホットソースから 0.5 Å 程度の中性子を得るのが良い一方で、磁気構造解析では 2.5 Å 程度の比較的長い波長の中性子が必要である。(ILL 等では短波長、長波長にそれぞれ装置がある。それが理想。) また、磁性研究のため少なくとも、長波長領域をカバーする回折計には偏極中性子を運用する能力が必要である。

また、高効率化のみならず、予想外の散乱を捕らえることができるという観点からも、二次元検出器が装備されるべきである。一方で、Tilting Counter を備えた 4Circle 回折計も非常に有用であるが、例えば、大面積に 2 次元検出器を持つ装置と組み合わせ 1 台でまかなうタンデム型もあり得る。いずれにしろ、既存の SENJU ではどこに磁気散乱が出るかわからない実験、FONDER では位置のわかっている磁気反射の精密測定、というような両者の利点を生かす利用法が考えられるが、同様に新たな回折計ではこれらの既存の装置との連携を考慮すべきである。

先に述べたように、既存のユーザーは、マグネット、希釈冷凍機、2K 冷凍機等の利用を前提にしているので、新たな回折計についてもこれらの試料環境装置のバラエティに対応する能力が必要である。

2.3.3 超冷中性子源

超冷中性子生成には、冷却された物質内で起こる非弾性散乱を用いたスーパーサーマル法を利用する。中性子を減速するという意味では、通常の中性子減速体（モデレータ）と同じであるが、減速後の中性子が周囲の温度からかけ離れたものになるので、スーパーサーマル法において減速に用いる低温物質をモデレータと区別してコンバーターと呼ぶ。コンバーターの材質としては、1 K 程度に冷却した超流動ヘリウム (He-II) および 8 K 程度の固体重水素 (sD₂) の 2 種類が有力である。それぞれの特徴は次のとおりである。

1. He-II コンバーター

He-II は単一フォノンの励起モードを持ち、そのフォノンの分散関係から 1 meV の極冷中性子を超冷中性子に転換する。⁴He の中性子吸収断面積が極端に小さいため、He-II 内に超冷中性子を長時間蓄積して、超冷中性子の密

度を高くすることができる。ただし、長時間蓄積の場合、蓄積された中性子では He-II 内部のフォノンによって再加熱されて失われるので、He-II の温度を 1 K 程度以下に保つ必要が生じる。

2. sD₂ コンバーター

sD₂ は複数のフォノンモードを持ち、5 - 10 meV の比較的高い領域において、冷中性子を超冷中性子に転換する^{*2}。重水素は散乱断面積がヘリウムに比べて大きく、冷中性子から超冷中性子への転換効率が He-II に比べて 10 倍程度大きくなる。一方、吸収断面積もヘリウムに比べて大きく、重水素内の超冷中性子蓄積時間は最大 150 ms 程度である。本稿では超冷中性子を重水素内に蓄積することは考えないので、sD₂ の温度は 5 - 10 K 程度が良い。それは同時に、sD₂ コンバーターを炉心に配置し、発生した超冷中性子を高い効率で取り出す必要が伴うことを意味する。

両者は一長一短であるため、どちらの実現についても新試験研究炉の設計段階で詳細な検討をする必要がある。

現段階では、炉心から中性子光学系を用い効率よく 1 meV の極冷中性子を高い効率で取り出し、炉心から離れた位置に設置した He-II コンバーターで超冷中性子に転換し利用することを第 1 案として想定する。その具体的な配置の例が、図 2.4 及び図 2.5 である。極冷中性子は、図 2.9 のように炉心付近まで挿入された集束機能を持った多層膜中性子ミラーを用いて He-II コンバーターに向けて輸送し、多層膜ミラーを内壁面にもつ He-II 槽を通過させる。重水槽および軽水槽領域

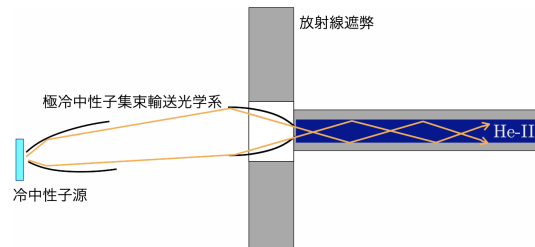


図 2.9 冷中性子減速体から極冷中性子成分を取り出す光学系の例。冷中性子減速体の近くまで集束機能を持った反射光学系を挿入することで、He-II コンバーターにより多くの極冷中性子を導く。

に中性子引き出し光学系を挿入することで、下流の He-II 超冷中性子源に導くべき極冷中性子強度を格段に向上させることを想定する。以下、JRR3 の冷中性子源の減速効率を参照し、新試験研究炉の熱中性子束が JRR3 と同等なることを仮定して議論を進める。現在実用化されている中性子 $m = 5$ のスーパーミラーを導管として冷中性子減速体直近まで挿入し、取り込み立体角 20 msr で 1 meV の極冷中性子を輸送する。なおスーパーミラーの m 値とはミラーの光学的アクセプタンスを表す指標で、反射できる最大の反射運動量を、Ni の反射臨界運動量を単位として表したものである。1 cm³ あたりの超冷中性子生成率は 6 UCN/s であることから [9]、350 リットルの He-II を用いるとすると、 2.3×10^6 UCN/s の超冷中性子生成率が得られる。

ここに、冷中性子源の性能向上、極冷中性子光学系の高度化を追加することで、超冷中性子の発生率を 1×10^8 UCN/s 程度、またはそれを超える水準に引き上げる。次節以降に述べるとおり、JRR3 の冷中性子源には、減速効率を向上させる余地があると考えられる。また、輸送光学系については、 $m=10$ 相当の輸送能力を実現して、極冷中性子の取り込み立体角を 4 倍程度増加させる。なお、sD₂ コンバーターを用いることで、超冷中性子発生率を増大させる可能性もある。

1. 冷中性子源の性能向上

図 2.10 に JRR3 と ILL の中性子スペクトルを示す。ILL の熱出力は 57 MW、JRR3 の熱出力は 20 MW なので、熱出力比はおおよそ 3:1 である。そして、熱中性子強度を比較すると概ね 4 倍程度であり、熱出力比に近い。一方、冷中性子強度は 1 meV 付近でざっと 20 倍程度異なっており、熱出力比から乖離している。熱中性子の強度ピークと冷中性子の強度ピークの高低が、ILL と JRR3 で逆転していることから差異は明らかである。

^{*2} 超冷中性子生成にとって最適な中性子温度は 30 K 程度である。液体重水素モデレータを用いて十分な強度を得ることができる。

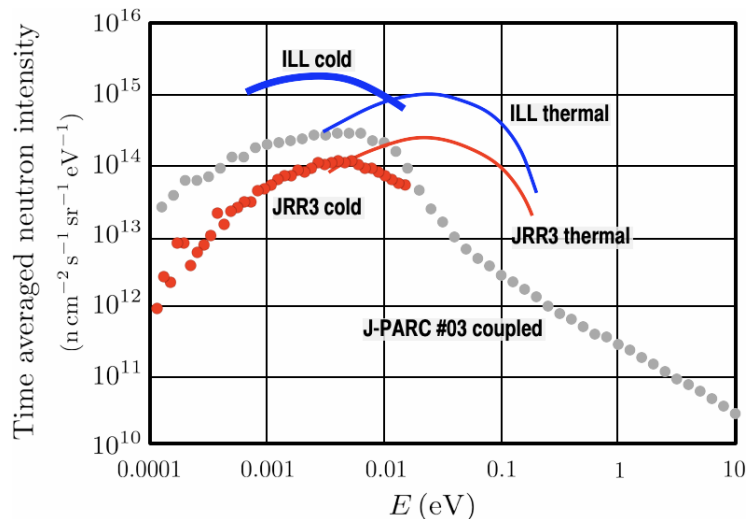


図 2.10 JRR3、ILL、J-PARC の中性子スペクトル

中性子スペクトルの形に注目すると、まず、強度ピークの位置に差異が認められ、JRR3 cold の中性子温度は ILL cold の場合よりも高くなっている。さらに冷中性子スペクトルのピークから低エネルギーに向かう強度曲線の勾配が異なり、JRR3 cold は ILL cold よりも急激に強度が減少している。この原因を究明することで、極冷中性子領域の強度向上が可能であると考えており、JRR3 cold に比べて 1 桁程度の減速効率向上の可能性もあるのではないかと推測される。そこで冷中性子減速体系について、注意深い詳細検討及び基礎研究を行う。このような冷中性子源の性能向上は中性子利用全体に波及する性能向上である。

2. 極冷中性子集束輸送光学系の開発

輸送光学系の実効的なアクセプタンスを増加させる手段として、現状考えられる選択肢には、ダイヤモンドナノ粒子による多重小角散乱を利用した中性子ミラー (DNP ミラーと呼ぶことにする)、多層膜ミラーがある。DNP ミラーは m 値が大きいのでアクセプタンスを大きくできるという利点があるものの、反射中性子が鏡面反射方向を軸として広がった方向に出てくる。今回は、極冷中性子を He-II コンバーターに向けて集束する輸送光学系としたいので、反射中性子の方向に広がりを持たないものが望ましい。そこで、大きな m 値を持つ多層膜ミラーの利用を考える。

一般に、多層膜を形成する際には大きさに制限があるため、多数の多層膜ミラーを高精度でアラインメントしながら組み上げて輸送光学系を作る。従来の多層膜ミラーはガラスなどの素材でできた平滑な基板表面に形成されているため、高精度のアラインメントを保つための構造体は大きくなっていった。しかし、精密機械加工技術の進歩によって、金属表面にアモルファス NiP 層を形成・平滑化し、その表面に多層膜ミラーを形成することが可能になった。この成果によって、自由曲面の多層膜ミラーがコンパクトに実現できるようになり、J-PARC で実用化されている。金属基板を利用することで、炉心周辺の高い放射線場や熱サイクルに対する耐性が高まることも期待できる。そこで、金属基板の多層膜ミラーを用いることとする。

多層膜ミラーの m 値は、 $m=10$ 程度を想定することを考えている。現状では、多層膜間の拡散によるポテンシャルのコントラスト消失、各膜の内部応力の違いによる膜剥離などの技術上の制約によって $m=5$ 程度が現実的である。しかし、最近、膜間に拡散抑制層を挿入する研究が進んだ結果、 $m \geq 10$ の中性子スーパーミラーの可能性が急浮上しており、近い将来に汎用的利用も実現するものと見込んでいる。そこで金属基板多層膜ミラーの開発研究を行う。

以上は基礎物理研究にとっての光学系開発研究の内容だが、この開発研究がひらく可能性はそれにとどまらない。大きな m 値を持つ多層膜ミラーが汎用技術として利用できるとなれば、従来よりもはるかに小さな曲率半径で冷中性子を曲げることができるようになる。すると、炉室からガイドホールに向けて中性子を輸送するときに生じる

遮蔽欠損を補うための隔壁の厚みを小さくできる可能性が生まれる。また冷中性子ビームの分岐の自由度は格段に大きくなる。このような中性子光学系の性能向上は、中性子利用全体に波及する性能向上である。

なお、実際に新試験研究炉が稼働した後、最上流光学系を維持したり、さらなる高度化を図る必要が出てくる。そのためには、放射線照射した材料の反射率などを測定できるような設備が欠かせないことにも留意する必要がある。

3. 固体重水素コンバーター

冷中性子減速体近傍に sD_2 を設置し、冷中性子を超冷中性子に変換する場合について述べる。図 2.10 の JRR3 の中性子フラックスを sD_2 に入射できたとすると、冷中性子フラックスは $1.6 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ となる。冷中性子から超冷中性子への転換効率は 1×10^{-8} であるので [10]、単位体積あたりの超冷中性子生成量は $1.6 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ と見積もられる。 sD_2 の体積を 10 リットルとすると、超冷中性子生成量は $1.6 \times 10^9 \text{ UCN/s}$ である。 sD_2 コンバーター中の蓄積可能時間は He-II よりも大幅に短く 30 ms 程度と想定されるため、到達可能な超冷中性子密度は $5,000 \text{ UCN/cm}^3$ 程度と想定される。 sD_2 では He-II よりも多くの超冷中性子発生率が見込めるが、 sD_2 を 10 K 以下という温度で炉心近傍に設置する必要があり、炉心や冷中性子減速体と合わせて詳しい技術設計が必要となる。 sD_2 には、固化時に多結晶になっている場合、超冷中性子が乱反射されて取り出し効率が上がらないという問題が報告されている [11]。そこで、 sD_2 結晶成長の研究や結晶界面を抑制して実装する技術、表面積を大きくし超冷中性子が効率良く取り出される設計 (grooved moderator 方式) などの開発研究が不可欠である。

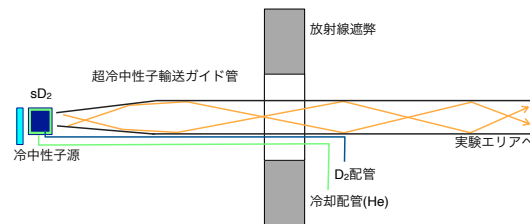


図 2.11 固体重水素 (sD_2) コンバーターの設置例。冷中性子減速体近傍に体積 10 リットル程度の sD_2 を設置し、5 - 10 K まで冷却する。発生した超冷中性子は良く研磨されたガイド管を通して実験エリアに輸送される。 sD_2 は冷却配管およびガイド管と一体として運用する。

2.3.4 極冷中性子

極冷中性子は、エネルギーが超冷中性子ほどには低くないために物質を透過することができ、また、波長はナノテクノロジーが迫ることができる空間的サイズに重なるほどに長い。この特質を利用すると、人工的に構成した実験装置を用いて中性子波動を精密に制御することが可能であり、多彩な中性子波動の干渉現象の研究を飛躍的に発展できる。近年発展目覚ましい多層膜中性子干渉計はその実例である。図 2.4 及び図 2.5 のような配置の場合、5 m 厚の He-II 超冷中性子コンバーターを用いるときには、入射極冷中性子のうち 75% 程度がそのまま透過する。これを極冷中性子ビームとして利用することを想定する。

ただし、このような構成は必ずしも必要でないので、超冷中性子源の下流ビームが使えない場合には、次のような方法で極冷中性子の利用を実現する。

1. 冷中性子減速体から、極冷中性子を取り出す光学系を追加する。
2. 冷中性子ガイド下流側で、極冷中性子成分を中性子ミラーで選択的に分岐する。この場合、冷中性子ガイドは冷中性子減速体に近い位置まで挿入し、高い効率で極冷中性子成分を輸送していることが必要である。

2.3.5 近熱外中性子源

近熱外中性子ビームを得るために新試験研究炉に高温減速体を設置することを提案する。熱外中性子ビームは原子核反応の研究や中性子非弾性散乱実験などに多く用いられており、本提案における複合核を用いた離散的対称性破れの研究や、アイソマーや核分裂反応の研究を熱外中性子源を用いて行うことを想定している。

熱外中性子源は 1970 年代に ILL に初めて実装され、現在は ILL およびドイツの原子炉 FRM-II で高温減速体が運用されている。20 MW の出力を持つ FRM-II では 14 kg の黒鉛を用いた高温減速体を用いられており、減速体は炉内の γ 線によって 2200K 程度まで加熱され、0.1~数 eV の領域で高い中性子強度を得ることが可能である [12]。中性子ビームは単結晶回折により単色化される。FRM-II ではゲルマニウムや銅結晶の高次ブラッグ回折を利用した近熱外中性子モノクロメーターが実現しており、新試験研究炉にも結晶回折を用いたモノクロメーターを設置することで 3 eV 程度までの単色化された近熱外中性子ビームを取り出す (図 2.12)。

^{139}La の共鳴エネルギーである $0.7\text{ eV} \pm 0.05\text{ eV}$ の中性子ビームを基準に考えると、FRM-II の熱外中性子ビームラインで得られる中性子量は $3 \times 10^7\text{ n/s}$ であり、J-PARC の中性子ビーム強度 $1.8 \times 10^7\text{ n/s}$ を超える中性子強度を持つ。従って 10MW 新試験研究炉に既存の技術を用いて熱外中性子源を作れば、J-PARC と同等の大強度の熱外中性子ビーム強度を得ることができると見込まれる。加速器中性子源は γ 線バックグラウンドが大きいことや、放射線遮蔽体により実験装置を設置できるスペースが非常に限られるため、実験環境という点でも原子炉中性子源に優位性がある。エネルギー分解能は加速器中性子源と比べ悪化するが、大きな装置が必要な強磁場や極低温環境下での実験や、低バックグラウンド環境を利用した精密な γ 線分光実験など高強度熱外中性子ビームを用いて新規性の高い種々の実験が可能である。

近熱外中性子が持つ問題点として、光学的なビーム制御が難しい点が挙げられる。中性子減速体近傍の中性子強度を J-PARC と比べると、FRM-II の熱外中性子源は J-PARC の 60 倍以上の中性子強度を持つが、試料位置では 2 倍程度まで中性子強度が落ちてしまう。これはビーム輸送光学が熱外中性子光学に適応できないことやビームを単色化する際の損失が原因であり、将来近熱外中性子の光学的制御の進展すれば、中性子輸送効率が改善し、中性子ビーム強度が大きく増大する可能性がある。近熱外中性子光学の研究は徐々に進んでおり、近熱外領域の中性子光学的性質の実証研究は屈折光学系でなされ、最近、反射光学系についても実証がなされた。また、 $m=10$ 付近の極めて m 値が大きな多層膜ミラーは実際に作成され、実用化されている。しかし、このような大きな m 値でのスーパーミラーとなると、層間拡散によってポテンシャルのコントラストが抑制されてしまうという問題によって、汎用光学素子としての研究は進んでいなかった。ごく最近、層間拡散を抑制する研究が進んだことで、 $m=10$ 以上の領域でもスーパーミラーを作成することが可能になってきた。この進展によって、近い将来において、近熱外中性子のビーム輸送が汎用的に可能になると期待される。

加えて近年中性子偏極デバイス： ^3He スピンフィルターの高性能化が日本グループで実現しており、高い偏極率での近熱外中性子ビームの偏極が可能になっている [4]。新試験研究炉においても ^3He スピンフィルターをビームラインに常設し、高品質な偏極熱外中性子ビームを安定供給する。これにより偏極原子核と偏極中性子ビームを組み合わせた原子核研究を始め、磁性研究や構造研究などが可能になる。

2.3.6 照射設備及び速・熱外中性子利用

放射化法を用いた核反応断面積の測定を実施できるよう、照射ポートが必要である。これは新試験研究炉に設置される汎用照射ポートを利用することで実行できると推測されるが、利用可能時間に不足が生じた場合は追加的に照射ポートを用意する必要がある。宇宙元素合成研究のための断面積測定研究が進んだのちに、速・熱外中性子ビームが必要となる。冷中性子、熱中性子及び近熱外中性子を光学的に除外し、純度の高い速・熱外中性子を得る。ビームを下方に向けて取り出すことで、床面下にビーム終端を持ってくることが考えられる。

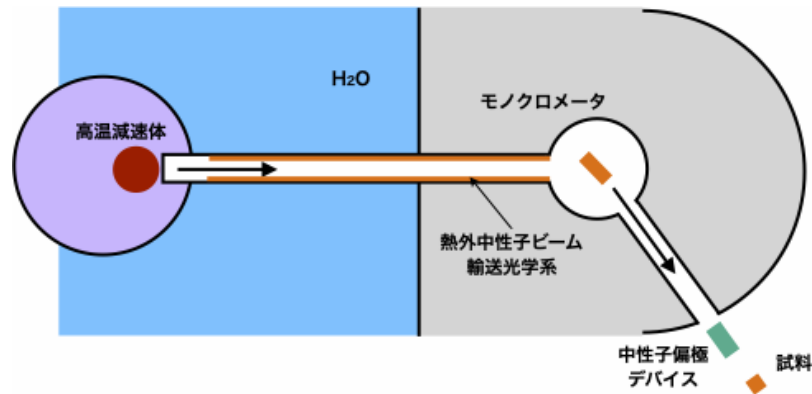


図 2.12 近熱外中性子ビームラインの概念図

2.3.7 新技術・新発想の世界最先端拠点の形成 - 中性子光学開発施設

以上の中性子を利用した研究全体にわたって、高度な中性子光学系の要求度は極めて高い。多層膜中性子反射光学素子の高性能化及び実用化技術は、中性子基礎物理に限らず、中性子ビーム利用全般に大きな利得をもたらす。特に、炉心に近い領域への光学素子の導入は、中性子源の利用効率を根本的にかつ飛躍的に改善するものであり、新試験研究炉の性能を世界一線に引き上げるだけでなく、将来に向けて世界をリードする重要な研究分野を形成する。そこで、多層膜ミラーの基板製作技術、多層膜積層技術を総合的に推進する研究施設及び研究推進体制を整備し、新試験研究炉の重要な柱に位置づけることを強く希望する。

また、日本において発展している ³He スピンフィルター技術は、偏極近熱外中性子の安定供給に資する上に、中性子ビーム利用全般で中性子スピン偏極の汎用的利用を開拓する。さらに、中性子基礎物理で必要となる標的核スピンの偏極技術も、研究分野を超えて中性子科学全般に大きな利得をもたらすものであり、中性子スピン光学という新たな汎用性を伴った分野形成を導くものである。

そこで、これらを合わせて中性子光学の開発及びその応用の発信体制を形成することで、新試験研究炉を世界的最先端研究施設として確立することを要望する。具体的に必要となる設備は、精密機械加工及び研磨設備、表面平滑度計測装置、多層膜形成装置、中性子反射率計、スピン交換光ポンピング装置、動的核偏極装置である。特に中性子光学素子の熱サイクル及び放射線損傷に対する耐性を評価できるよう、中性子ビームを浴びた試料の中性子散乱及び反射率測定ができるようなオプションを持った中性子計測装置を設置することも要望する。

1. 中性子源

熱中性子源については、主に原子炉周辺の冷却水プールがその働きを担うため、主に冷中性子源についての意見を検討した。新型試験研究炉では、冷中性子源の個数、配置およびその形状について最適化を行い、分析機器やガイド管に最適な強度の高い冷中性子が供給されるようにするべきである。また、稼働開始時の設計から段階的に改良・最適化を進められるように冷中性子源のメンテナンス期間における着脱、取り外し後の放射化物等の保管・作業場所の確保も重要である。

2. 中性子制御

ガイド管は、熱・冷中性子源との相互作用を念頭に最適化が進められるべきである。スーパーミラーを施したガイド管を設置することは前提条件として、冷中性子源とのカップリングの向上によるビーム強度増大、ガイド管の炉心への近接配置などの改良を進めることで、逐次その性能を向上させてゆくための環境を整えることが重要と考えられる。具体的には、ガイド管のメンテナンスのためのスペースの確保、放射化物の搬送・保管スペースの確保、ガイド光学系の試作改良のためのスーパーミラー成膜施設の整備などがあげられる。また、ガイド管の放射線耐性

を試験するための照射施設およびその解析（放射化物の解析）ができるスペースの確保も重要と考えられる。

3. 検出・装置開発・新技術

これらの項目は、解析装置に付属する検出器や試料環境などを除いた、汎用的・共通的に利用可能な検出器などの装置開発、新技術に関して述べる。確立された回折散乱装置とは別に、新規なコンセプトに基づく実験を試行したい場合、ビームラインの試験を行う場合などを想定して共通的に利用できる検出器として、 ^3He -PSD 検出器（処理回路付き）、2次元 TOF 観測が可能な nGEM 検出器など、位置分解能は無いが（0次元）計数率の高い検出器（Li/B 入りプラスチックシンチレーター+PMT など）、ビーム位置確認用の中性子カメラ（CCD ベースのもの）などを 1～2 セット装備することが望ましいと考えられる。また、検出器開発・試験用にテスト用多目的ビームラインの設置も望まれる。

2.3.8 実験建屋について

なお、新試験研究炉における利用希望は多岐にわたっており、それらをまとめて模式的に例示したものが図 2.13 である。これに対応するための炉心周辺の配置は、例えば図 2.4 及び図 2.5 のようなものがある。具体的な装置を議論するた

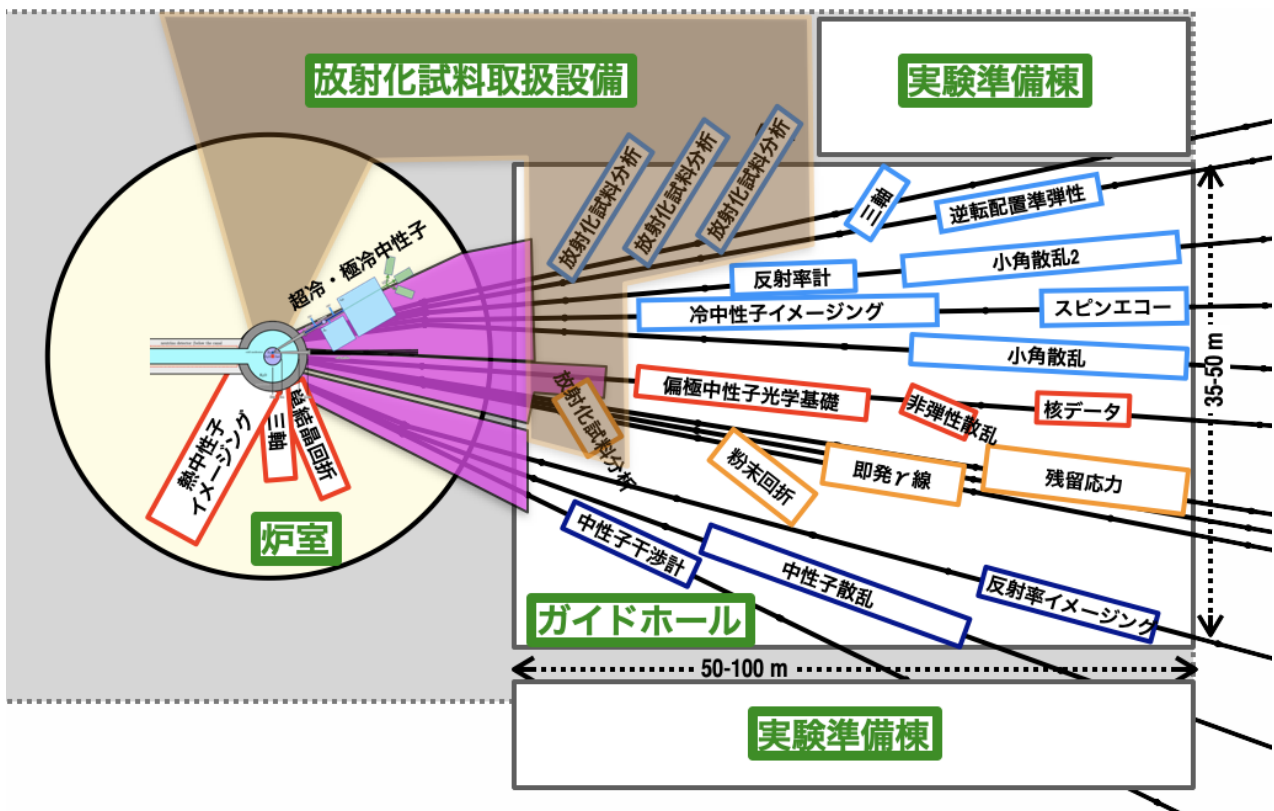


図 2.13 中性子研究施設の一例 (模式図)

めには、炉心及び施設設計との緊密な情報交換が必要である。特に、照射試料をそのまま中性子散乱測定に回したいという要求は、分野を超えて分布している。図 2.13 には、あくまで模式的にそのような可能性を含めてある。また、炉室及びガイドホールに隣接する実験準備棟は、ユーザーからの要求度が高い。原子炉施設から離れた場所に大掛かりな試料準備研究施設ができた場合でも、例えば複雑・不安定な生体分子プロセスが研究の中心となると思われる生体高分子研究や他の敏感な機能性分子材料研究等のために隣接箇所にある化学実験室等の環境が必要である。

2.3.9 設計建設体制及び施設運営

新試験研究炉は、設計そのものに学術性を打ち出すことで、施設としての先進性を確保し、さらにその後の運用時の利用開拓の基礎とすることが極めて重要である。そのためには、広く専門家及び一般利用者との情報交換を緊密に推進することが欠かせない。新試験研究炉建設は、一般に国際会議を主導できる内容であると考えられるが、上記のように戦略的な推進方法を取るのであれば、設計及び建設機関の議論そのものに学術性を付与できるため、継続的に学術拠点として国際的な立ち位置を確保することができると考えられる。これはその後の施設運用時においても同様であり、利用課題の学術的意義の評価や、成果占有型利用の受け入れ方法、基盤技術の継承と革新、などについて、一線の研究者や重要度の高い占有利用などの信用を獲得するためにも、運用方法についてのオープンな議論は必須である。

中性子利用者の大半は、中性子を数あるプローブの一つとして利用するユーザーであるため、試料準備、中性子ビーム測定、データ解析などについての手厚い支援が必要となる。加えて、共同利用申請や諸手続きについても、少なくとも J-PARC と同程度の、使用しやすい規則・運用やシステムが開発可能な体制の確保が望まれる。

1. 重水素化試料施設

試料作成及び調整を実行できる装置群を備えた準備施設が必要である。ソフトマター全般で重要となるのが、重水素化試料施設であり、当該研究を推進する上では不可欠である。これら大型結晶の作成・重水素化試料の調製・ドメイン塗分け試料の作成に関しては、コスト・技術の両面から難度が高いが、要求度も高い。ヨーロッパ、アメリカ、オーストラリアでは、中性子実験施設に併設して、あるいはその近傍に重水素化施設などの研究施設があることが多い。重水素化、あるいは部分重水素化した試料での測定が可能かどうかで中性子実験施設での研究成果が全く異なる。また、国際協力の観点からもそのような施設からのサポートがあるかないかで海外からの利用者の数が相当に変わるであろうことは容易に想像がつく。中性子実験施設は、重水素化試料施設と一緒に運営されることでその真価が発揮されると言っても良い。

2. 計算科学

同様なことは原理計算、分子動力学計算などの計算科学による散乱実験の解釈にも言える。そのような支援があれば中性子散乱単独では得られない様々な情報を引き出すことができる。これらを整備することで、多くのユーザーを招き、新試験研究炉が研究拠点としての意義をさらに付け加えることになると考えられる。

3. データ取り扱い及び解析

データ取得やデータ記録についての標準化や運用の維持を行うチームが必要である。またデータ解析そのものを研究対象とするグループを用意する必要がある。データ処理・計算機や他のデータ（結晶・クライオ・NMR）との連携解析は、ただ単に計算科学の知識があるだけでは不足で、構造生物の解析に多くの経験を持った研究者でなければならない。また遠隔実験やデータの取り扱いにおいて、外部からの（への）アクセスに強い制限があるネットワークでは研究に支障が出るので、基本的には公開予定のデータであることを前提に、セキュリティ確保の仕組みを構築した上で、柔軟な規則・運用ができる使用しやすいネットワーク環境が必須である。

4. ユーザーを支援する研究者および技術者

日本の大型施設の共通の問題点であるが、世界一流の施設を建設しても十分なビームライン研究者、専門の技術職員、装置に関わるポストドックなどが極端に少ないことが多い。さらにビームライン、実験装置を設計、建設するのに必要なエンジニアも諸外国に比べるとあまりに少ないことが多い。諸外国の大型中性子利用施設においては、利用支援、およびビームラインや実験装置を設計、建設、運用する装置担当者および技術者を、ビームライン当たり 6 人程度配置することが標準であるが、現在の日本の大型施設においてはこの水準に達していない。新試験研究炉においては海外施設と同程度の人員を配置し、十分なユーザー支援を行える体制を整える必要がある。

また、研究成果を上げるためには各研究分野のエキスパートのサポートが不可欠であり、ビームライン研究者が論文化するところまで関与する体制が欲しい。海外ではそのようなサポートがなされている。さらに実験装置を試料

の測定条件に合わせて最適な配置に組み替える専門の技術職員が必要である。これは例えば SACLA ではすでに実現している。

5. 放射化試料の中性子散乱設備

放射化した試料に対して中性子散乱実験を可能とする設備を整備することが有用である。

6. 測定作業の機械化による実験支援

中性子の利用方法の中には、測定方法を系統的に記述できるような利用方法を採用している場合も少なくない。そこで、ロボットによる測定実施、AI による測定条件選択やデータ解析を自動化することで、ユーザー支援の省力化を図ることも考えられる。

7. 物質研究施設

新試験研究炉から遠くない場所に、中性子利用に特化した物質研究施設があることがこの原子炉での研究成果を上げるために必須である。そこにはクライオ電顕、NMR、実験室 X 線小角散乱 (SAXS)、計算機システム、wet ラボなどが充実している必要がある。この研究施設は新試験研究炉と一体運営する必要があるが、日本全国の同様の研究機関と DX を最大限に活用し、ネットワークを組みながら運営することが必要である。場所としては例えば敦賀市内などが望ましいという要望が出ている。

8. 国際連携

各研究分野で利用する中性子測定装置は、それぞれ ILL、ORNL、FRM-II、ANSTO、HANARO など世界の大規模な中性子施設には必ず数台設置されているようなものになるであろう。そこに新試験研究炉に世界でも高性能な測定装置が利用可能になった段階で、現在・将来このコミュニティに属して研究活動を行っている国内の研究者を中心に多くの国際連携研究が立ち上がることになる。しかし、そのためには中性子実験装置だけではなく、試料調製・検証のための研究施設と一体化した運営ができることが不可欠である。重水素化試料施設であれば、国際的な重水素化に対するネットワーク (DEUNET) の一つの拠点となることができると考えられ、同様の国際研究ネットワークの拠点として国際連携の場で活躍することが期待される。

9. 地元連携と人材育成

地元連携としては第一に人材育成があげられる。新試験研究炉施設において大学生、大学院生だけではなく、地元の中学、高校生に対し、最先端科学に触れるまたと無い機会を与える。それは実際の研究だけでなく、最先端の計算科学であったり、AI、遠隔制御であったり、生体高分子の試料調製などの物理・化学・生物学的なものまで非常に多くの分野の学習機会を与えることができる。将来的に最先端の産業と連携させるまたとない機会である。また昨今の不安定な国際情勢を鑑みて、中性子散乱技術に関わる要素の独自開発、国産化・内製化も大いに推奨すべきで、広い意味での産業連携と技術者の人材育成に繋がると思われ、真の国際連携にも国内の基礎体力の向上が不可欠である。

● 施設管理

中性子ビーム利用のみでなく、照射利用の開拓も進める。その場合は、JRR-3、常陽などの既存の施設と連携して RI 製造などを進める。産業利用の開拓のため、福井県内で募集した産業利用課題のトライアルユースを JRR-3 と連携して実施する、産業分野ごとに個別に研究会を編成して啓蒙活動を推進する。また、企業向けの (特に産業利用に関して)、測定代行や解析代行を行う機関あるいは企業の育成を行う。

● 産業応用、残留応力、イメージング、即発 γ 線粉末中性子回折装置：自動試料交換機、低高温温調システム (-30℃ ~1000℃ 程度)。解析ソフトの充実 (J-PARC や海外施設などとの共通化を図れると良い)。

第3章

まとめ

以上の通り、新試験研究炉に対する中性子科学会の展望は多岐にわたる。新試験研究炉の熱出力は世界最大級とは言えないが、それを補ってあまりある革新的なアイデアの結集に、日本の中性子測定基盤技術を動員することで、中性子科学の世界的拠点となって活躍する可能性は大きい。

あらためて中性子散乱装置というものを考えた時、最上流の中性子源及び中性子ビーム輸送光学から、最下流の中性子検出器及び信号処理システム・データ取得まで、を総合的に最適化して解析能力を最大化する設計方針が極めて重要である。特に中性子源周辺の変更は現実的には容易でないため、将来の中性子需要を広く捉えた上で、中性子源の建設段階から十分に考慮しておくべきである。

その際、中性子のビーム制御技術の革新によって大きく広がる可能性を取り込むことで、最終的な施設の能力が大きく左右されることを忘れてはならない。中性子ビームの輸送光学だけ取り出してみても、その性能向上によって輸送能力を桁違いに増大させることが可能であって、中性子源を桁違いに強力にすることに相当する。このような研究は日本が強みとする部分であり、新試験研究炉では設計段階からこのような可能性を取り込むことが可能であるという極めて稀な好機を最大限活かすべきである。

以上のような考え方で計画を推進できれば、設計段階から関わって推進の現場で活躍する若手人材は、高度な知的集約とその実践経験を積むこととなり、通常容易には得難い貴重な財産として将来の知的活動に貢献する人材となるであろう。そしてそれらの人材は、高度な学術的成果を生んだり、またその積み重ねとして実用的な成果あるいは経済活動に直結するような成果を生み出す可能性を担って、日本の科学技術の長期戦略に貢献できるものと期待する。

謝辞

本答申書の取りまとめに際して、広く中性子科学会員のご意見を賜り、その集約作業においても中性子科学会員のご協力をいただいたことに対して、本ワーキンググループ構成員から深い感謝の意を表す。

加えて、当学会外の関連研究分野の方々にもご協力いただいた。ここで本答申書の執筆にご協力いただいた方々について、学会員非会員を問わず、お名前を挙げて謝意を表す。

基礎物理分野に関して、「原子炉を用いた基礎物理を推進する有志の会」から名古屋大学 北口雅暁氏、奥平琢也氏、大阪大学 嶋達志氏、梅原さおり氏、吉田斉氏、東京工業大学 藤岡宏之氏、片渕竜也氏、広島大学 飯沼昌隆氏、九州大学 吉岡瑞樹氏、福井大学 小川泉氏、中島恭平氏、高エネルギー加速器研究機構 川崎真介氏、三島賢二氏、理化学研究所 山形豊氏、羽場光宏氏にご協力をいただいた。

物質科学分野では、固体物性分野および関連する装置検討に関して、意見取りまとめから報告書作成の全般にわたって日本原子力研究開発機構 中島健次氏にご協力いただいた。同時に固体物性コミュニティの多くの方々に貴重なご意見をいただいた。ソフトマター科学分野、特に反射率に関しては三重大学 鳥飼直也氏、液体・非晶質分野では、山形大学 亀田恭男氏、日本原子力研究開発機構 川北至信氏、にご協力をいただいた。

産業応用・残留応力・中性子ラジオグラフィ・即発 γ 線分析の分野では、花王株式会社 久米卓志氏、京都大学 伊藤大介氏、齊藤泰司氏、産業技術総合研究所 友田陽氏、名古屋大学 高見誠一氏、日本原子力研究開発機構 栗田圭輔氏、篠原武尚氏、菖蒲敬久氏、藤嶋輔氏、松江秀明氏、S.Harjo 氏他、多くの皆様のご協力をいただいた。また、放射化学会からは、産業技術総合研究所 三浦勉氏、理化学研究所 羽場光宏氏、京都大学 高宮幸一氏から助言をいただき、参考にさせていただいた。放射化分析、即発 γ 線分析装置については、放射化学会が主体となって議論が進められると思われるので、今後も緊密な情報交換を行い、発展的な協力関係に努めていきたい。

また中性子検出器について 東北大学 吉田純也氏、研究炉中性子源について、日本原子力研究開発機構 新居昌至氏にご協力をいただいた。

ここにあらためて深い感謝の意を表す。

参考文献

- [1] M. Baldo-Ceolin *et al.*, *Z. Phys. C* **63**, 409 (1994).
- [2] K. Abe *et al.*, *Phys. Rev. D* **103**, 012008 (2021).
- [3] C. Abel *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **124**, 081803 (2020).
- [4] T. Okudaira *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **977**, 164301 (2020).
- [5] F. M. Gonzalez *et al.* (UCN τ Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **127**, 162501 (2021), M. A.-P. Brown *et al.*, *Phys. Rev. C* **97**, 011056 (2021).
- [6] R. Colella, W. Overhauser and S. A. Werner, *Phys. Rev. Lett.* **34**, 1472-1474 (1975).
- [7] F. M. Marqués and J. Carbonell, *Eur. Phys. J. A* **57**, 105 (2021).
- [8] 放射化学 第44号 2021年9月発行 (PDF形式, 17.8MB) <http://www.radiochem.org/pdf/rad.nw44.pdf> 特集：福井・新研究炉；中性子利用研究含む (三浦勉、高宮幸一)
- [9] R. Golub, D. J. Richardson, and S. K. Lamoreaux, “Ultra cold neutron”, Adam Hilger, Bristol (1991).
- [10] Z. Ch. Yu *et al.*, *Z. Phys. B* **62** 137 (1985).
- [11] A. Anghel *et al.*, *Eur. Phys. J. A* **54**, 148 (2018).
- [12] V. Hutanu *et al.*, *Conference Proceedings on European Research Reactor Conference, Helsinki (Finland)*, 978-92-95064-36-2 (2021)