

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) 第二次答申 — 「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 —

令和3年11月26日

概要

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を取りまとめる。本文書は、当該ワーキンググループから中性子科学会会長への第二次答申である。

1 中性子科学会の展望

中性子は、実社会や学術研究において、原子核の性質を利用する上での基盤として欠かせないものとなっている。中性子科学会は、基礎学術分野から応用研究における中性子利用を網羅的に推進する学際領域を活動範囲としており、中長期的視野に立ったロードマップを随時更新している [1]。

現在、中性子科学会における議論の対象となる中性子は、熱中性子および冷中性子領域を中心として、高エネルギー側は中間熱外および近熱外、概ね近熱外領域から超冷中性子にわたる (表 4 参照)。これらの利用には中性子減速体が必須であり、核分裂炉または加速器に減速体系を組み合わせた中性子源が用いられるのが一般的である。中性子利用における性能は、中性子源、中性子減速体系、中性子輸送光学系、測定装置、解析手法などを総合した性能であり、単位時間あたりに達成できる目的達成度として評価される [2]。代表的な中性子施設は、研究炉 JRR-3、加速器施設 J-PARC などの世界拠点施設、研究炉 KUR のような地域拠点施設である。これらは汎用施設である。中性子利用需要に対する中性子供給不足を解消するためには、これらの大型化・高機能化が直接的な解決策であり、JRR-3 および J-PARC とともに次期計画を打ち出している [3, 4, 5, 6, 7]。一方で、中性子輸送光学系や測定装置の技術革新により、目的に応じた中性子利用が可能となり、施設中性子源と呼ばれる小規模な中性子施設の実用的利用の実証が進んでいる。単純に利用機会の増大をもたらすだけでなく、人材育成上、有用な基盤である。これは日本発の世界的な流れであり、UCANS [8]、JCANS [9] といった有志団体が活動が続いている。さらに東日本大震災の際には、JRR-3 と J-PARC の同時停止によって、一定期間、中性子供給が極端に減少したこともあり、分散配置された中性子源の有機的ネットワークによる安定的な中性子供給が強く望まれることとなった。以上を受けて、中性子利用のプラットフォームの形成の重要性が認識され、中性子科学会としては、中性子施設ネットワークの提言 [10]、中性子施設連携ワーキンググループにおける活動が続けられている。中性子科学の長期的展望の推進における学術面を中性子科学推進委員会、技術基盤と技術革新を基礎基盤部会が議論を行っている。当ワーキンググループでは、学術面と技術面を統合する方法論を担当する。

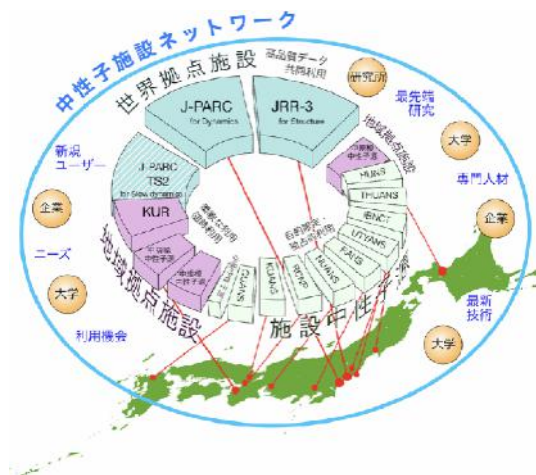


図 1: 中性子施設ネットワーク [10]

参考文献

- [1] 日本中性子科学会 ロードマップ検討特別委員会提言 (平成 30 年 6 月 11 日)
- [2] 日本中性子科学会 基礎基盤部会 各種委員会報告書 (平成 27 年 7 月 24 日)
- [3] 第 24 期 学術の大型研究計画に関するマスタープラン (マスタープラン 2020) 学術大型研究計画 (区分 I) 計画 No.65 「MLF 第 2 ターゲットステーション:中性子・ミュオン科学の新たな展開」
- [4] J-PARC 19-04 「J-PARC 物質・生命科学実験施設 第 2 ターゲットステーション 概念設計書」 (2020 年 2 月 5 日)
- [5] JAEA-Tech-2015-010 「JRR-3 冷中性子現装置における高性能減速材容器の開発」 (新居昌至, 田村格良, 羽沢知也)
- [6] JRR-3 将来計画検討委員会 (固体物理分野) 検討結果報告書 (2018 年 7 月 30 日)
- [7] JRR-3 将来計画検討委員会 分野 II 報告書 -小角・反射率・高分解能装置がカバーする分野- (2019 年)
- [8] Union for Compact Accelerator-driven Neutron Sources
(<http://www.ucans.org/>)
- [9] Japan Collaboration on Accelerator-driven Neutron Sources (日本加速器中性子源協議会)
(<http://www.jcans.net/>)
- [10] 第 24 期 学術の大型研究計画に関するマスタープラン (マスタープラン 2020) 学術大型研究計画 (区分 I) 計画 No.116 「中性子施設ネットワーク」

2 「もんじゅサイトに設置する新たな試験研究炉」

以下、「もんじゅサイトに設置する新たな試験研究炉」を「福井炉」と称する。

中性子科学にとって必要な中性子施設の性能とは、中性子源、中性子減速体系、中性子輸送光学系、測定装置、解析手法などを総合した性能であり、単位時間あたりに達成できる目的達成度として評価される。

JRR-3 再稼働、J-PARC パワーランプアップなどによって、中性子供給量は増大しているものの、未だ中性子需要を満たすには不十分である。そのため、輸送光学系や測定装置・解析手法などの中性子利用効率における技術革新が強く望まれているが、それを実現するための基礎研究を行うための中性子利用機会は不十分であり、同時にそれを実行するための人材育成に必要な中性子利用機会も不十分である。今後の中性子需要拡大を満たすために、JRR-3 アップグレード、J-PARC 第 2 ターゲットステーション建設などが計画されているものの、それらの実現のためには高度計測を支えるためには、さらなる技術革新、さらなる人材育成が求められる。それらを補う方法として、拠点施設型の小規模中性子源の普及が図られている。その重要な点は、中性子供給と中性子利用方法を総合的に実体験することで技術継承が継続的に行われることである。しかし、大型中性子施設および次期中性子施設では、小規模施設での実体験に基づいた知見に加えて、大規模施設の安定運用と大規模な利用者数に対応できる技術スキルとマネジメント能力が要求される。従来は、京都大学研究炉 KUR が大きく貢献してきた。これを引き継ぐ施設が存在しないという問題があったところに、福井炉建設計画が持ち上がったことは、極めてタイムリーであり、今後の中性子科学の発展にとっての生命線と言ってよい。また現在の大型中性子施設は関東地方 (茨城県) に集中しており、安定的な中性子利用を継続する上での懸念事項である。福井炉建設は、この懸念を払拭する上で最良の解決策である。

中性子科学会として、福井炉に対する提言をまとめる。

1. 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

- 中性子科学を展開するためには、(1) 小角散乱、(2) 中性子イメージング、(3) 粉末回折、(4) 反射率計が最低限必要な汎用装置である。この4装置を以下「優先装置」と呼ぶ。優先装置の中でも、特に(1)小角散乱と(2)中性子イメージングの優先度が高い。
- 中性子ビームに適した原子炉設計が必要である。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。なおビーム引出し口の現在の想定数は、熱中性子取出プラグ3、冷中性子源2、近熱外中性子源1である。冷中性子源には取出し光学系を直付け可能なスペースを確保することが求められる。
- 利用上の「使いやすさ」を考慮に入れた施設設計を施す

2. 拠点形成と人材育成

- 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。
- 次世代研究用原子炉、デバイス設計、装置建設技術者、および研究者の育成を行う。
- 若手研究者を育成する。特に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。
- 量子ビーム科学の普及を目的として、中性子研修センター(仮称)の設置し、継続的な普及活動を行う。
- 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。
- 外部ユーザーのアクセスに不便がないように配慮する。

以上の二つについて、技術的・体制的な施設設計を必須にしていくことが肝要である。

また将来につなげるために「新技術・新発想の世界最先端拠点」を形成することも同じく重要性が高い。これは、優秀な人材を確保するために必須である。以下に、具体的な項目を列挙する。

1. 中性子光学

線源近傍まで導入可能な金属基板スーパーミラーの導入、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。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析、核偏極試料、などの技術革新が考えられる。

2. 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、福井炉が新技術・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。

3. 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。中性子科学会において俎上に上っている項目を列挙する。

- 冷中性子導管
集光型冷中性子広角散乱装置、冷中性子三軸分光器、冷中性子イメージング、逆転配置型準弾性散乱装置
- 炉室
熱中性子三軸分光器、熱中性子イメージング、単結晶回折分光器
- 熱中性子導管
粉末回折装置、残留応力測定装置、即発ガンマ線(放射捕獲反応)計測装置

- 近熱外中性子導管
偏極中性子光学基礎研究、原子核データ取得装置、非弾性散乱装置
- 極冷中性子導管
中性子散乱基礎研究装置、中性子干渉計、反射率イメージング装置

さらに、長期照射による材料工学および原子核素粒子物理の可能性も検討されている。実験装置配置の例及び建屋配置の例を2及び3に示す。

4. 学術的拠点形成

観点を定めた学術的な拠点形成を薦める。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。

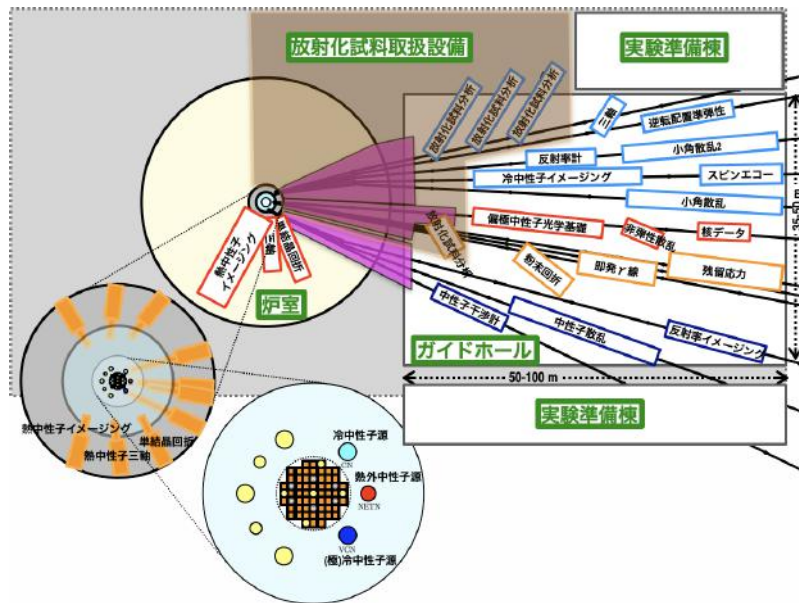


図 2: 実験装置配置の例



図 3: 建屋配置の例

3 サイエンスと産業応用

「優先装置」とした小角散乱、イメージング、反射率計、粉末回折についての基本的な観点をまとめておく。今後、中性子源特性を考慮に入れた詳細検討を行う必要がある。また同様に優先装置以外についての検討も進める必要がある。

3.1 小角散乱

世界のどの中性子施設でも常に筆頭に挙げられ装置である。ソフトマター、生命科学、材料、磁性体など多種多様な分野においてナノ～ミクロンスケールの構造の解析に用いられ、産業界からの需要も多い。そのため汎用性の高い装置が2台は必要である。

装置としては以下のような考慮が必要である。

- ガイド管末端への設置：冷中性子ビームラインに設置し、速度選別機を用いる必要がある。
- スペクトル温度が低い減速材：通常、0.6nm程度の波長の中性子を用いサブミクロンスケールの構造を解析するが、もっと大きなミクロンスケールの構造を解析するときにはその2-3倍の波長を用いる。
- 減速材からガイド管の始まりまでの距離が短い方が良い：波長の長い中性子を効率よく取り出す。
- 中性子輸送系での減衰を最小限に：窓材、ガイド管、ガイド管の間のギャップによる減衰を減らす。
- ビームコリメーションの最適化：試料(求めるデータ)に応じて分解能を考慮しつつビーム強度の増強を図る。
- 大面積の2次元位置検出器の利用：様々な方向に散乱される中性子を一度に検出し、測定効率を飛躍的に向上させる。

3.2 イメージング

中性子は透過力が強い、水素を含む物質がよく見えるなどの特長があるため、他のプローブで観察できない材料科学、土木・建設、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に使われている。特に、中性子イメージングは金属に対する透過力が高いため、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いった極めてユニークな手法である。産業分野としては、自動車・機械、素材などの業界における利用が想定される。

このように、サイエンスへだけでなく産業利用への親和性が非常に高い中性子イメージングは、その利用がこれからも期待されるものであり、今後建設される中性子源においてもサイエンスと産業利用を見据えた装置が設置されるべきである。

使用する中性子エネルギーについては、熱中性子と冷中性子が主となっている。冷中性子に比べ熱中性子の方が一般に透過力が高いと言う特長がある。一方、冷中性子は位相コントラストなどの新たな手法の利用や手法そのものの開発などが可能となる。それぞれに、特長がある測定が異なるため、熱中性子と冷中性子それぞれ別個のビームラインを整備することが望ましい。それぞれについての推奨事項は次のとおりである。

産業利用の頻度が特に高い中性子イメージングについては、日本全体で常時どこかのビームが利用できる体制が必要である。また、広く産業利用を受け入れられるように、熱中性子と冷中性子それぞれ別個のビームラインを整備することが望ましい。それぞれについての推奨事項は次のとおりである。

1. 熱中性子

高強度・大面積ビームを利用した短時間露光による、高速度撮像、3次元CT、実機を用いたオペランド計測を特色とするのが妥当である。また、工業製品のような大型の被写体を配置できるようにサンプルエリアを広くとることが望ましい。

2. 冷中性子

高コントラスト・高位置分解能を利用した精細な計測および偏極などを利用した革新的なイメージングを特色とする。このため、ビーム制御を行うための光学系を配置できるよう、ビーム進行方向に広いエリアを確保し、フレキシブルに使えるビームラインとすることが望ましい。これ等の機能を利用することによって産業応用に加えて、材料科学など広くサイエンス応用に展開できる。

さらに、高速中性子を利用すれば熱中性子よりも高い透過力が期待できるが、熱外および高速中性子イメージングに対しては、冷中性子や熱中性子とは別にビームラインを配備することも検討することが推奨される。

3.3 反射率計

汎用性を重視し、非偏極中性子反射率計を優先するのが妥当であり、偏極中性子反射率計は追加的に別装置として配備することを勧める。反射面は水平とし、ビームをパルス化することが妥当である。試料作成設備はビームラインに隣接させることが望ましく、またオペランド計測が可能となるようにすることが望まれる。

想定するユーザー層は、日本国内では高分子系が多いと想定される。米国では材料系、欧州ではソフトマター全般が多い。電池の充放電による変化や経年変化、接着面や板金接着、塗装界面などの静的および経時変化の評価が想定される。

3.4 粉末回折

熱中性子領域を利用する回折計（産業利用推進用回折計）と冷中性子領域を利用する回折計（学術研究推進用回折計）の2種類を展開することが考えられる。産業利用推進用回折計は、化学、産業利用、工学材料等で幅広い分野を対象とした装置であり粉末回折計全体の需要の過半を見込める。高いフラックスと多彩な試料環境を柔軟に受け入れられる汎用性が必須となる。フラックスの観点からは炉室内に設置することが望ましいが、柔軟な試料環境の利用、幅広いユーザーのアクセスを考慮すると、ガイドホールの設置となるかもしれない。

学術研究推進用回折計は、物質科学、広義には凝縮系科学分野の学術利用を中心とした装置であり、一定の需要と高い学術的成果が見込める。また、教育用の機能も担わせることが想定される。高分解能、低バックグラウンドに配慮したものである必要がある。ガイドホールの冷中性子ガイド管への設置が想定される。

粉末回折計は、運用方法も鍵となり、メールインサービスの展開等も含めて、「福井炉」が置かれる西日本の新規ユーザー、ライトユーザーを重視したアクセスの容易さを確保することや、先に触れたように教育用として中性子科学を目指す学生等に対して、中性子散乱の入り口となることも重要である。また、重点テーマを実施するための利用環境と付帯設備と組み合わせた特色ある装置にカスタマイズ可能とすることも考えられる。

世界をリードする原子炉中性子施設 (想定10MW)
—研究者と利用者が集う利用方法・利用技術集約拠点—

既存の技術で早く確実に建設

JRR3, KURで培ったノウハウ
小角散乱、反射率、粉末回折、中性子イメージング
Beam 実験に適した原子炉(炉心・冷及び熱中性子源)
Guideによるbeam輸送の最適化
使いやすい施設設計
装置最適化設計

新技術の世界最先端拠点(日本のお家芸)

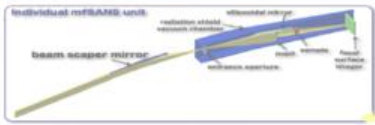
世界初: 金属基板スーパーミラーを線源近くに導入
日本発: 集光型小角散乱装置によるコンパクト設計
高度な偏極、検出技術
設計方法のパラダイムシフト
非弾性散乱(3軸分光器、Chopper, Backscattering, Spin Echo)
1nm帯極冷中性子、近熱外中性子源の開発
オペランド科学センター(バイオセンター)
情報中性子科学 応用センター

拠点形成・人材育成

西日本の中性子研究・産業利用の拠点
次世代研究用原子炉・デバイスの設計・建設技術者・研究者
量子ビーム科学の将来を担う若手研究者
量子ビーム科学の普及(中性子研修センター)
ユーザーのアクセスの利便性
専任顧問による先端研究への諮問

b

KURと理研の共同開発




試験研究炉 ビーム利用2020/12/18JSNS-RWG: 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)第一次答申

図 4: 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の第一次答申 (2020 年 12 月 18 日)

表 1: 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メンバー表

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

表 2: 日本中性子科学会 ロードマップ検討ワーキング第 1 期の会合開催日程

第 1 回会合	2020/11/11	(12:30-13:20)	
第 2 回会合	2020/11/25	(11:00-12:50)	
第 3 回会合	2020/12/4	(18:00-19:30)	
第 4 回会合	2020/12/11	(18:00-19:30)	
第 5 回会合	2020/12/18	(18:00-19:30)	
第 6 回会合	2020/12/25	(18:00-19:30)	
第 7 回会合	2021/01/08	(18:00-18:45)	
第 8 回会合	2021/01/15	(18:00-18:30)	
第 9 回会合	2021/01/22	(18:00-19:30)	
第 10 回会合	2021/01/29	(18:00-19:30)	
第 11 回会合	2021/02/05	(18:00-19:30)	
第 12 回会合	2021/02/12	(18:00-18:15)	
第 13 回会合	2021/02/19	(18:00-19:30)	(拡大会合)
第 14 回会合	2021/02/26	(18:00-19:00)	
第 15 回会合	2021/03/05	(18:00-19:05)	
第 16 回会合	2021/03/12	(18:00-19:30)	
第 17 回会合	2021/03/19	(18:00-19:30)	
第 18 回会合	2021/03/26	(18:00-18:40)	

表 3: 日本中性子科学会 ロードマップ検討ワーキング第 2 期の会合開催日程

第 19 回会合	2021/06/04	(18:00-19:30)	
第 20 回会合	2021/06/11	(18:00-19:30)	
第 21 回会合	2021/06/18	(18:00-19:30)	
第 22 回会合	2021/06/25	(18:00-19:30)	
第 23 回会合	2021/07/02	(18:00-19:30)	勉強会 (医療用 RI 製造)
第 24 回会合	2021/07/09	(18:00-19:30)	
第 25 回会合	2021/07/16	(18:00-19:30)	(レイアウト議論開始)
第 26 回会合	2021/07/30	(18:00-19:30)	
第 27 回会合	2021/08/06	(18:00-19:30)	
第 28 回会合	2021/08/13	(18:00-19:30)	
第 29 回会合	2021/08/20	(18:00-19:30)	
第 30 回会合	2021/08/27	(18:00-19:00)	
第 31 回会合	2021/09/03	(18:00-19:45)	調査報告 (粉末回折、反射率計、イメージング)
第 32 回会合	2021/09/10	(18:00-19:15)	
第 33 回会合	2021/09/17	(18:00-19:30)	勉強会 (冷中性子源)
第 34 回会合	2021/09/24	(18:00-19:30)	
第 35 回会合	2021/10/01	(18:00-19:30)	
第 36 回会合	2021/10/08	(18:00-19:10)	勉強会 (小角散乱)
第 37 回会合	2021/10/15	(18:00-19:40)	勉強会 (イメージング)
第 38 回会合	2021/10/22	(18:00-19:30)	(第 2 回福井炉コンソーシアム委員会報告)
第 39 回会合	2021/10/29	(18:00-19:10)	(評議員向け報告会)
第 40 回会合	2021/11/05	(18:00-19:30)	
第 41 回会合	2021/11/12	(18:00-19:30)	
第 42 回会合	2021/11/19	(18:00-19:15)	
第 42 回会合	2021/11/19	(18:00-19:00)	(第二次答申提出)

表 4: 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	現在の主な利用分野
速中性子 FN (fast neutron)	1MeV 以上	原子核物理、核変換 (RI 製造)
遠熱外中性子 FETN (far epithermal neutron)	20-1000keV	原子核物理、核変換 (RI 製造)
中間熱外中性子 METN (medium epithermal neturon)	0.1-20keV	BNCT
近熱外中性子 NETN (near epithermal neutron)	0.1-100eV	物質研究、基礎物理
熱中性子 TN (thermal neutron)	20-100meV	物質研究、基礎物理、産業利用
冷中性子 CN (cold neutron)	1-20meV	物質研究、基礎物理、産業利用
極冷中性子 VCN (very cold neutron)	1-1000 μ eV	基礎物理
超冷中性子 UCN (ultracold neutron)	1 μ eV 以下	基礎物理