

8. 中性子生成ターゲット

高エネルギー加速器研究機構

原 田 正 英

目 次

中性子生成ターゲット

1	はじめに	8-1
2	中性子生成過程	8-1
2.1	中性子生成反応	8-1
2.2	世界の中性子源	8-2
2.3	核破砕反応における中性子ターゲット	8-3
2.4	核破砕反応の入射エネルギー依存性	8-4
2.5	中性子の減速	8-4
2.6	中性子の反射	8-4
2.7	線源集合体	8-4
3	J-PARC 核破砕中性子源	8-5
3.1	全体構成(中性子ステーション)	8-5
3.2	水銀ターゲット	8-5
3.3	液体水素減速材	8-5
3.4	中性子ステーション周辺	8-6
3.5	中性子ビームラインと中性子実験装置	8-6
3.6	粒子輸送計算コードシステム	8-7
3.7	中性子計算と実測	8-7
3.8	核発熱と放射線損傷	8-8
3.9	放射化	8-8
3.10	遮蔽評価	8-9
3.11	キャビテーション損傷	8-10
3.12	遠隔操作	8-10
3.13	ターゲットの最適化	8-11
3.14	減速材の最適化	8-11
3.15	簡素化形状と工学形状	8-12
4	まとめ	8-13
	参考文献	8-13

中性子生成ターゲット

1. はじめに

中性子をプローブにする物質科学研究や生命科学は、強度重視の科学とも言われ、中性子源には、高い中性子強度を求められる。中性子を生成する方法は様々あるが、大強度でパルス状を目指すなら、加速した陽子ビームを利用し、核破砕反応を利用した核破砕中性子源を用いることが多い。陽子ビーム出力に大きく依存するが、安全上の設備が必要であるため、利得が低くなる傾向にある。一方で、中性子源構成の最適化と適切な工学設計により、中性子強度を大きく回復することができる。

本講義では、J-PARC 核破砕中性子源を主として、陽子ビーム入射から中性子ビーム供給までの中性子生成過程を説明し、実際上の J-PARC の核破砕中性子源を例にその説明を行う。

2. 中性子生成過程

2.1. 中性子生成反応

中性子生成には以下の種類がある種類があり、その反応を示す図を Figure 2-1 に示す。

- 1、核分裂反応（例：研究用原子炉）
- 2、放射性同位元素（RI）による崩壊（Am-Be 線源）
- 3、ガンマ線・電子線による光核反応（例：電子線加速器）
- 4、加速粒子による核反応（例：DT 中性子源）
- 5、高速に加速された粒子による核破砕反応

これらを利用するには、原子炉中性子源（1）、RI 線源中性子源（2）、加速器中性子源（3～5）に大別される。

連続的に多量に中性子を発生されるには、原子炉が良く、パルス状に大強度に発生されるには、核破砕反応を利用することが良いとされている。原子炉では、ウランなどの核燃料物質による核分裂反応で発生した中性子を次の核分裂反応に利

用するため、連続的に反応が進むため、大きなエネルギーを加えることなく、中性子の生成が期待でき、多量の中性子を発生しやすい。一方で、過度な反応にならないように制御する必要がある。一方、核破砕反応は、高エネルギーに加速した粒子を質量数の大きな原子核に衝突させることで、原子核を破砕し、多くの中性子を発生させる。また、放出された粒子が次の原子核で反応を起こすなどカスケード的な反応が期待でき、多くの中性子を生成できる。一方で、加速のために多くのエネルギーを必要とする。Table 2-1 に、主要な中性子生成と中性子収量、エネルギーコストを示す。

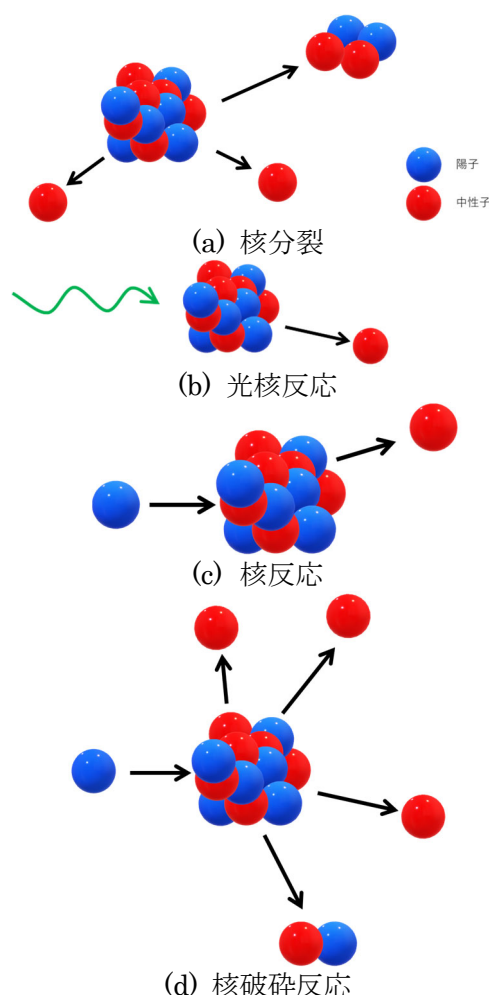


Figure 2-1、主な中性子生成反応の図解

Table 2-1、典型的な中性子反応と中性子収量、エネルギーコスト

名称	反応	中性子収量	中性子生成に必要なエネルギー
Cf-252 線源	放射性同位体	$3.8 \times 10^9/\text{GBq}$	-
Ab-Be 線源	放射性同位体	$6 \times 10^4/\text{GBq}$	-
電子線加速器中性子源 (タングステン)	光核反応	$1.7 \times 10^{-2}/e^-$	2 GeV
DT 中性子源	核融合反応	$3 \times 10^{-5}/\text{d}$	10 GeV
Be(p, n)	核反応 (交換反応)	$1.6 \times 10^{-3}/\text{p}$	4 GeV
U-235 核分裂炉	核分裂反応	2.3/fis.	180 MeV
陽子ビーム入射(水銀)	核破砕反応	80/p	38 MeV

中性子のエネルギー識別をするためには、中性子の飛行時間を測定する方法が良く、利用効率として、加速器でパルス状に生成することが良い。一方で、大規模な加速器が必要となる。また、大強度になるほど、除熱と遮蔽が重要となる。放射性同位元素崩壊を利用する場合は、生成量は期待できないが、ランニングコストが低くなる。光核反応を利用する場合は、比較的扱いやすい電子線加速器を使用できる。加速された粒子による核反応でも、比較的小型の加速器を使用できる。

Figure 2-2 には、核破砕中性子源と原子炉との中性子束スペクトルを示す[1]。軽水炉では、高エネルギー平坦なスペクトルであるが、核破砕中性

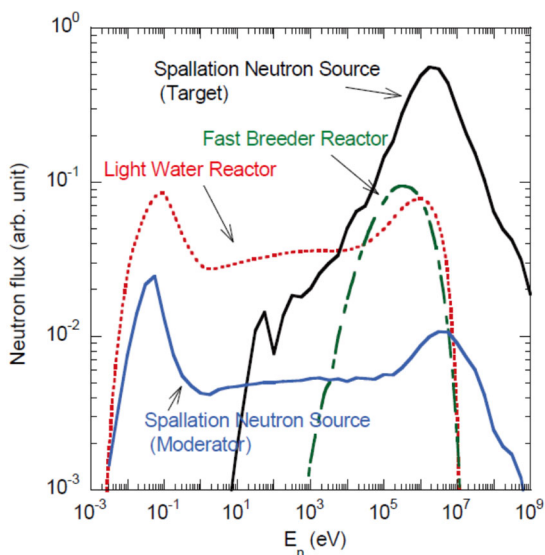


Figure 2-2、原子炉と核破砕中性子源でのスペクトルの違い[1]

子源では、高速中性子に偏ったスペクトルになっている。

2.2. 世界の中性子源

1950年代からの世界の中性子源[2]は、Figure 2-3 に示すように、まずは、原子炉中性子源が主となってきた。1980年代より加速器中性子源が活用され始められ、原子炉中性子源より、当初は、実効熱中性子束が低かった。加速器の技術開発が進み、加速器の出力が大きくなってくると、実効熱中性子束は急激増加していき、近年では、原子炉中性子源を凌駕するに至っている。第2ターゲットステーション計画が進んでいるので、加速器中性子源の実効熱中性子束はますます高くなっていく。

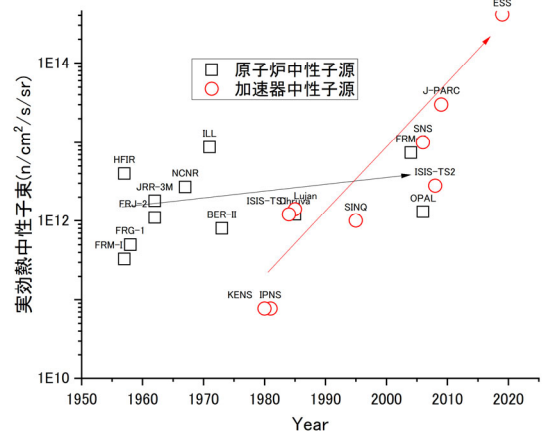


Figure 2-3、主な中性子施設と熱中性子束[2]

2.3. 核破砕反応における中性子ターゲット

核破砕反応を見た場合、同じ入射エネルギーでも質量数が高い物質の方が中性子の放出量が大きくなる。そのため、ターゲット材としては、タンタル、タングステン、水銀、鉛、ビスマスが使用されることが多い。中性子収量が多いウランを使用することもあったが、自発核分裂や遅発中性子生成によるバックグラウンド中性子が多いため、近年では使用が避けられている。固体ターゲットとしては材料強度が期待できるタンタルが使われていたが、残留放射能や崩壊熱が高く、近年はタンタル被覆したタングステンを使うことが多い。Figure 2-4 は、ラザフォードアップルトン研究所で稼働中のビーム出力 160kW の ISIS 中性子源の固体ターゲットである[3]。固体ターゲットは、ターゲット板を複数並べて、その隙間に冷却水を流して、冷却するという構成となっている。固体ターゲットは、構造がシンプルであるが、間接冷却なので除熱能力に制限があり、数十から数百 kW 出力の施設で使われている。1MW クラスになると、除熱や熱応力の観点から、中性子生成と冷媒を兼ねた水銀が使われるようになった。Figure 2-5 は、1MW ビーム出力の J-PARC の核破砕中性子源の水銀ターゲットである[4]。水銀は質量数が大きく核破砕に適しており、さらに常温で液体状のため、水銀を容器中に流し、ビームを照射することで中性子を多量に生成している。また、ターゲット材自身を交換するような必要がないため、容器のみを交換することで、ターゲット材を継続して使用できる利点がある。一方、容器自体は、放射線損傷に加え、キャビテーション損傷を受けるため、その対策が必要である。水銀の他に、鉛や共晶合金である鉛ビスマスを使う中性子源もある。Figure 2-6 には、スウェーデンに建設中の 5MW ビーム出力の ESS (European Spallation Source) の回転ターゲット[5]を示す。材質はタングステンで、これをホイール状に配置し回転させることで、放射線損傷と発熱を分散できるメリットがあり長寿命化が期待できる。回転機構や冷却機構がうまく稼働するか試金石となる。

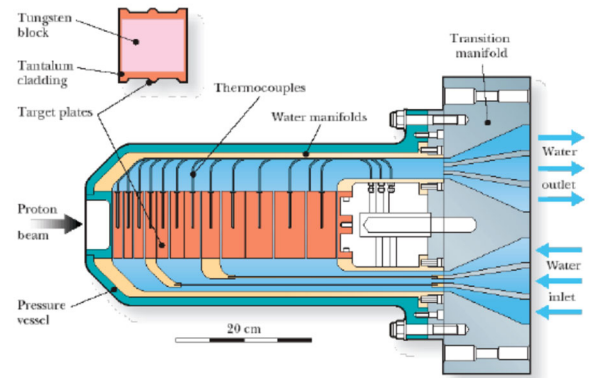


Figure.2-4、ラザフォードアップルトン研究所の ISIS 中性子源の固体ターゲット [3]

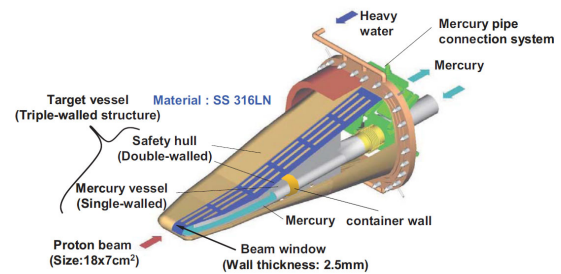


Figure 2-5、J-PARC 水銀ターゲット [4]

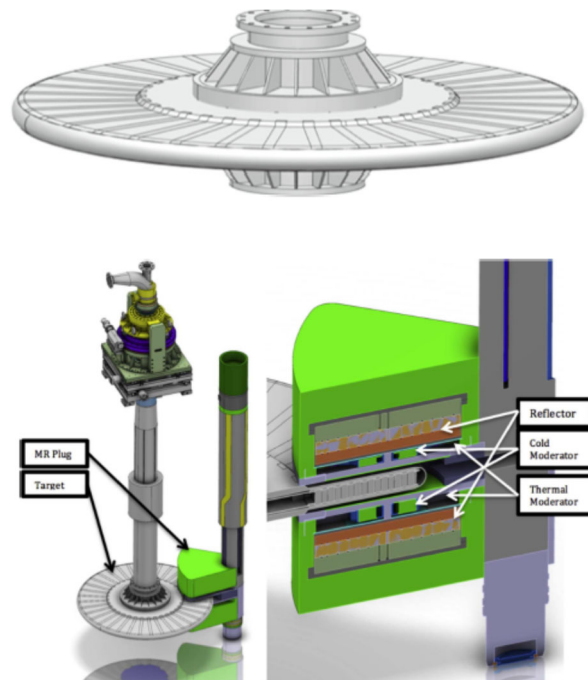


Figure 2-6、ESS の回転タングステンターゲット [5]

2.4. 核破砕反応の入射エネルギー依存性

入射エネルギーが高いほど、生成される中性子の量は増える。一方で、効率としては、陽子ビームの場合 1.1GeV 当たりが最も良いとされている。Figure 2-7 に、鉛ターゲットにおける中性子収量実験値 (Y_p) とエネルギーコスト (ϵ_p) の陽子エネルギー依存性を示している。陽子ビーム 1.1GeV のときにエネルギーコストが最も低いことが分かる[6]。

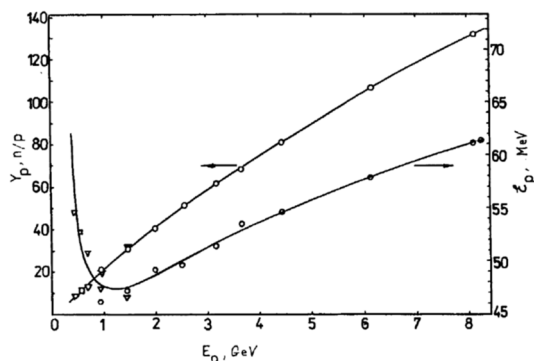


Figure 2-7、鉛ターゲットにおける中性子収量実験値 (Y_p) とエネルギーコスト (ϵ_p) の陽子エネルギー依存性[6]

2.5. 中性子の減速

生成された中性子のエネルギーは高いが、物質生命科学実験に用いられる中性子は冷熱中性子

Table 2-2、2MeV から 0.025eV までの衝突回数[7]

名称	衝突回数
H	18.2
H ₂ O	19.8
D	25.1
D ₂ O	35.8
Be	87.1
C	115
O	152
Fe	510
U	2172

が最もよい、中性子を減速する必要がある。中性子の減速は、原子核との弾性散乱を繰り返しながら減速していくことが一般的である。Table 2-2 は、2 MeV から 0.025 eV までに減速される際の弾性衝突の回数を示している[7]。弾性衝突は、対象の原子核の質量数が小さいほど、中性子の減速が早くなり、衝突回数が少なくなる。Figure 2-8 は、水素、ベリリウム、鉛中での中性子のエネルギーと減速時間との関係を示したものである。水素含有物質である水素が最も早く減速していることが分かる。一方で鉛では、中性子の減速が遅いことが分かる。中性子の減速が遅いと、パルス状に中性子を発生される場合に、中性子パルス幅の増大を招く。

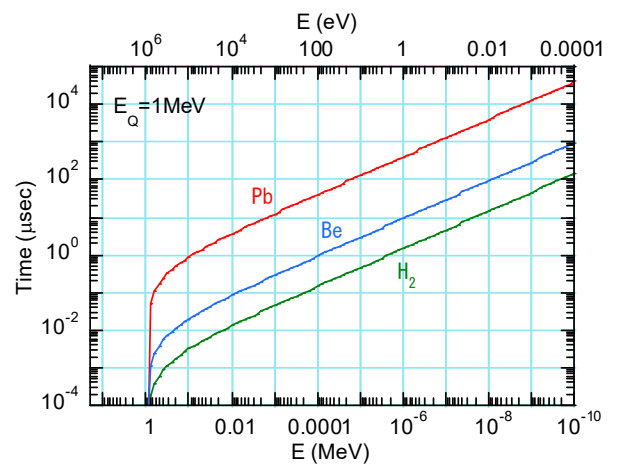


Figure 2-8、減速時間とエネルギーの関係

2.6. 中性子の反射

生成された中性子は、飛び散る方向に生成される。反射材は、飛散する中性子を集めて線源の中性子強度を高めるために使用される。反射材としては、散乱断面積が大きく、吸収断面積が小さいことが望まれる。同時に減速も期待できることから、質量数の小さい物質が良い。炭素やベリリウムが使われることが多く、特に、ベリリウムは、機械強度や伝熱性能がよいことから、大強度の核破砕中性子源では、多く使われている。

2.7. 線源集合体

中性子生成ターゲットで生成された中性子は、エネルギーが高いため、一般的には、冷熱中性子領域まで減速させる必要がある。そのため、中性子生成ターゲットの他に、反射体、減速材と呼ば

れるものが必要である。これらを含めたものが中性子ステーションと呼ばれる。

減速材は、中性子の減速過程の最終段に用いられるもので、一般的には水素含有物質が使用される。大強度の中性子源では、放射線損傷の観点から、液体水素が唯一の材料となる。水素含有材の中では、液体もしくは固体メタンが良いとされる。これは、水素密度が高いことと、中性子の減速反応があることである。その他、軽水、ポリエチレンが使われている。

反射材は、中性子生成ターゲットで発生した中性子を使用する。全断面積が大きく吸収断面積が小さい低質量数の材料が使われることが多い。ベリリウムや炭素が良く使われる。

3. J-PARC 核破砕中性子源

3.1. 全体構成（中性子ステーション）

Figure 3-1 に J-PARC 核破砕中性子源の全体構成を示す[4]。中性子生成ターゲットとして、水銀を使用している。J-PARC の核破砕中性子源は、陽子ビームライン、陽子ビームが入射し核破砕反応により中性子を生成する水銀ターゲット、発生した中性子を反射、減衰させるベリリウム・鉄反射体、実験装置に冷熱中性子を供給する液体水素減速材、中性子を供給する中性子ビームライン、中性子のビームを制御する中性子シャッターで構成される。これらの機器の外側には、遮蔽体が設置され、中性子源で発生する中性子を含む放射線を遮蔽する。これらを含めて、一般的に中性子ステーションと呼ぶ。

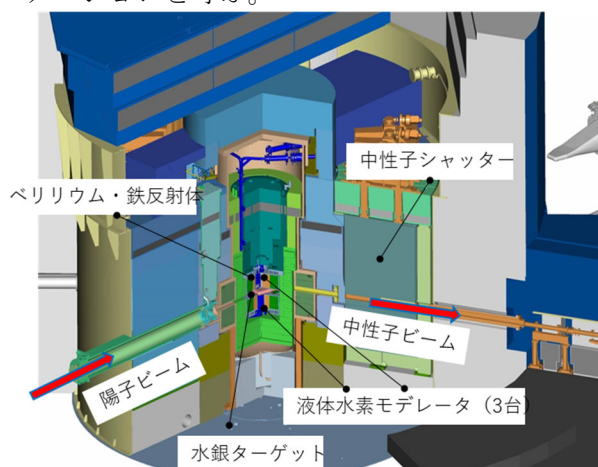


Figure 3-1、J-PARC 核破砕中性子源[4]

3.2. 水銀ターゲット

J-PARC の核破砕中性子源の水銀ターゲットを Figure 2-5 に示す。水銀ターゲット容器は、材料強度が期待でき、放射線損傷に強いステンレス 316L 製であり、水銀を内封できる構造となっている。水銀が漏洩した時の保護容器としてセーフティハル、セーフティハルを冷却する冷却水容器で構成されている。Figure 3-2 に、水銀循環設備[4]を示す。水銀は、陽子ビーム 1MW の入熱に対し、0.5MW の発熱を除去する必要があるため、遮蔽体の後ろに、水銀循環設備を設置しており台車の上に設置されている。台車は、水銀容器と遮蔽体ごと、移動できる構造となっている。

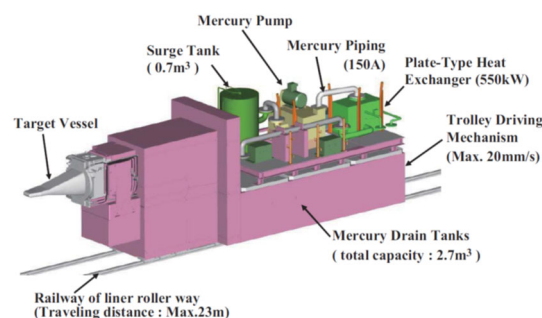


Figure 3-2、水銀循環設備[3]

3.3. 液体水素減速材

Figure 3-3 に、J-PARC の核破砕中性子源における減速材を示す[4]。3 台の 20K 液体水素減速材で構成されており、中性子強度が高い結合型減速材、中性子パルス性能を高めたポイズン型非結合減速材、中性子強度と中性子パルス性能がよい非結合減速材で構成されている。非結合型というのは、ターゲット・反射材と減速材の間に中性子吸収材を設置しているもので、中性子パルス幅や中性子のテールを広くする遅い中性子を吸収することで、中性子強度を犠牲にして、中性子パルス特性をよくするものである。ポイズン型は、減速材の中に中性子吸収材を設置し、減速材容器を実効的に薄くして、中性子パルス幅を短くすることに機能する。減速材容器は中性子の吸収断面積

が小さいアルミニウム合金できており、A6061かA5083が使用される。

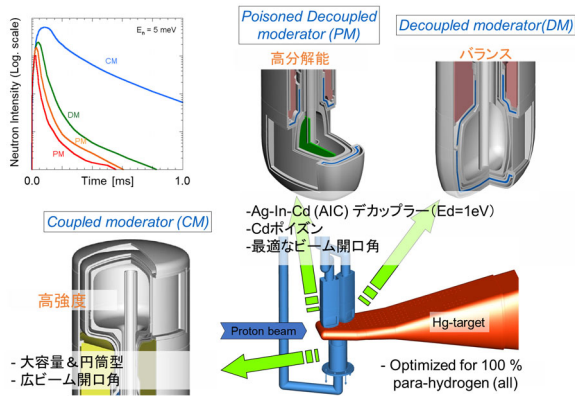


Figure 3-3、J-PARC 核破碎中性子源の減速材[4]

3.4. 中性子ステーション周辺

Figure3-4 に、中性子ステーションの周りの機器の図を示す[4]。中性子ステーションは、遮蔽体で覆われているが、ヘリウムベッセルと呼ばれる

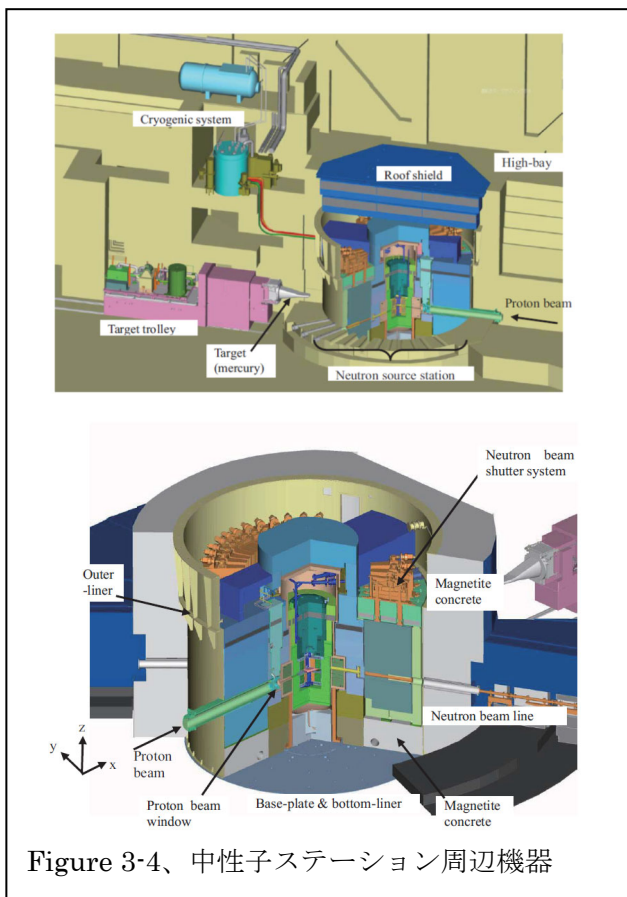


Figure 3-4、中性子ステーション周辺機器

ヘリウムを充填して容器の中に、中性子ステーション機器が設置されている。その外側には、そこから、液体水素を循環する設備、水銀ターゲットを抜き差しする水銀台車、中性子シャッターを駆動するシャッター駆動設備、冷却水を循環する冷却水循環設備を要している。中性子ステーションの外側にも重コンクリートや軽コンクリート遮蔽体で囲まれている。

3.5. 中性子ビームラインと中性子実験装置

Figure3-5 に、中性子ビームラインの一例を示す[8]。中性子源で発生した中性子は、中性子ビームラインを通して、中性子実験装置に導かれ、ここで様々な実験を行うことになる。中性子実験装置も、遮蔽体に覆われている。また、安全のために、運転中に人が立ち入ることができない構成となっており、万が一の場合は、インターロック設備により、ビームが止まる設計となっている。中性子実験装置内に人が出入りする際には、中性子シャッターにより中性子を遮断する。

Figure3-6 は、現在の中性子実験装置の配置である[9]。23本のビームポートがあり、うち、21本のビームラインが使用されている。放射状に設置されていることが分かる。



Figure 3-5、中性子ビームライン[8]

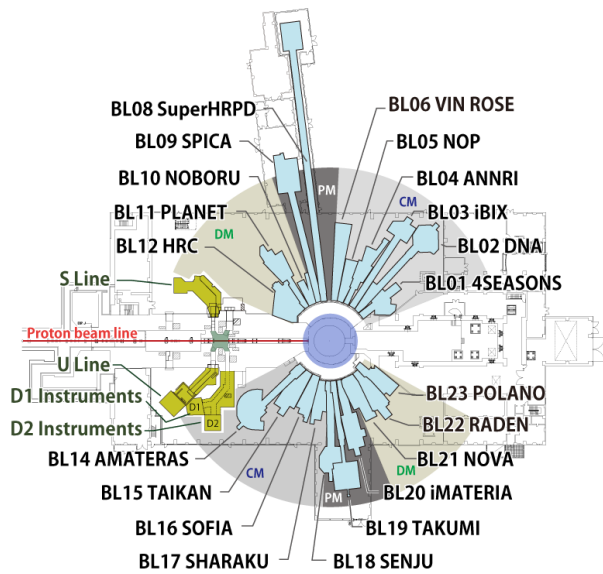


Figure 3-6、J-PARC の中性子実験装置[9]

3.6. 粒子輸送計算コードシステム

J-PARC の核破砕中性子源は、あらゆるパラメータをシミュレーションベースで決定して建設された施設である。その根幹をなすのが、粒子輸送計算コードシステムである。Figure 3-7 に粒子輸送計算コードシステムを示す[1]。Figure 3-8 には中性子源の計算モデルを示す[1]。このコードシステムの中心に PHITS コード[10]を据えて、シンプルな計算モデルから計算をはじめ主要なパラメータを決定し、そこから詳細な計算モデルを

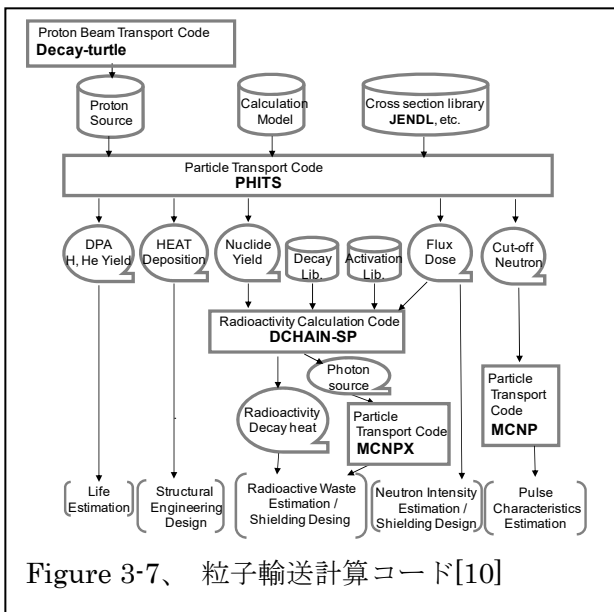


Figure 3-7、粒子輸送計算コード[10]

構築して、データを評価し、設計に活用した。発熱データは、熱応力の計算に、放射線損傷データは、寿命評価に、放射化のデータは、線量評価、廃棄物計画に使用された。

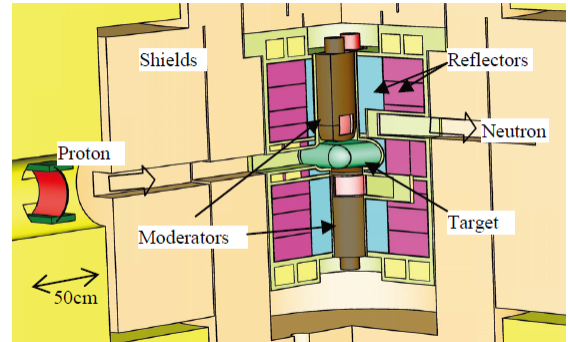


Figure. 3-8、詳細な中性子源計算モデル[10]

3.7. 中性子計算と実測

粒子輸送計算コードシステムにより、様々なパラメータが導出され、活用されるが、最も重要なパラメータは、中性子源から放出され、中性子実験装置に供給される中性子の特性である。Figure 3-9 に、中性子実験装置での中性子スペクトルの計算結果と実測値を示す[1]。設計段階で、詳細モデルによる計算を行い、中性子特性を評価した。これらの計算値は、運転開始後に検証実験を行い、実測値と良い一致を示すことを確認した。このように、設計計算の妥当性を確認している。

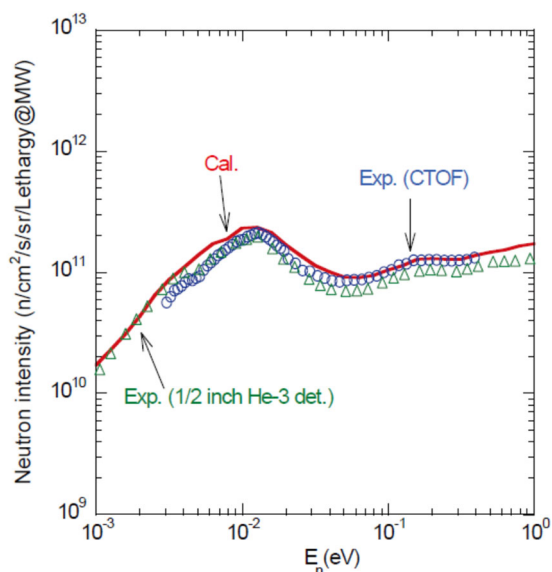


Figure 3-9、中性子スペクトル[1]

3.8. 核発熱と放射線損傷

核発熱と放射線損傷は、計算結果の一例を Figure 3-10 に示す[11][12]。放射線損傷は DPA (Displacement Per Atom) で表記され、原子の弾き出し数を意味する。ターゲット部分での核発熱と放射線損傷が高いことが分かる。また、陽子ビームライン付近も高いことが分かる。これらをもとに、伝熱計算や熱応力計算を行い、中性子源機器の工学設計を行った。

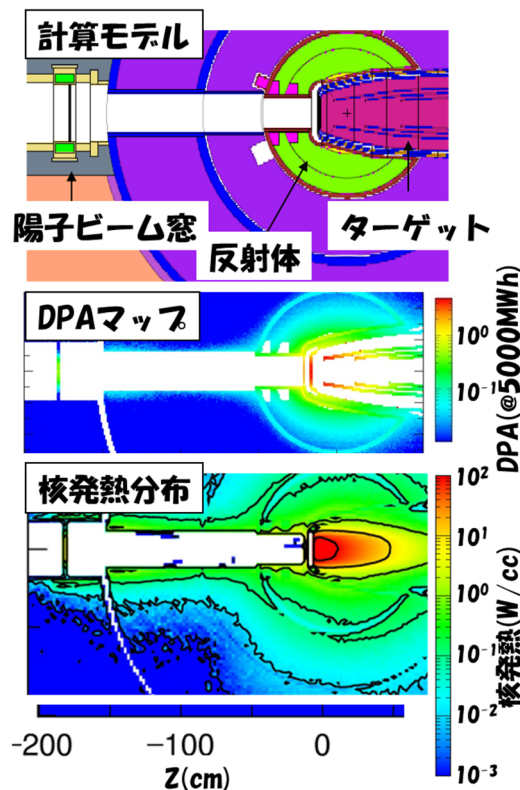


Figure 3-10、ターゲット周辺の放射線損傷と核発熱分布[11][12]

3.9. 放射化

放射化量は、保管廃棄計画や作業計画を立てる上で、重要なパラメータである。Figure 3-11 に、ターゲット容器の運転後の放射性核種の時間変化を示したものである。ステンレス 316 製の容器は、半減期が長い Mn-54 (半減期: 312 日) や Co-60 (半減期: 5.3 年) が多く生成される。この 2 核種は、キャスク評価のみならず、保管廃棄計画に大きな影響を与える。

Figure 3-12 は、使用済みのターゲット容器を運搬する際に必要な遮蔽キャスクの設計計算に使用したものである。生成された放射性核種のデータをもとに、ガンマ線の輸送計算を行って遮蔽厚さを決めている。

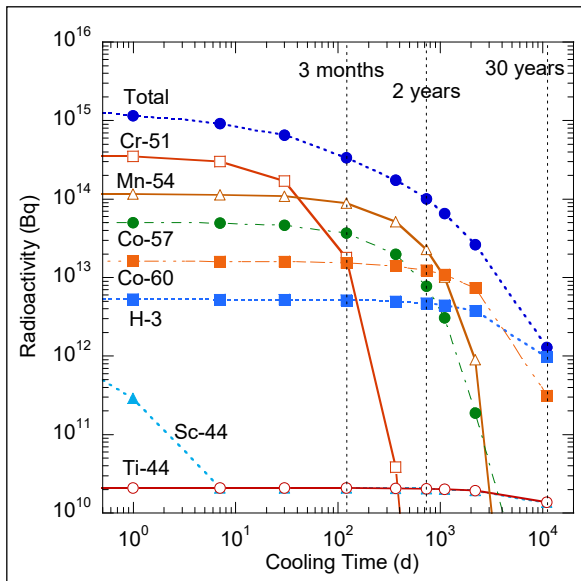


Figure 3-11、ターゲット容器の放射能成分と時間変化

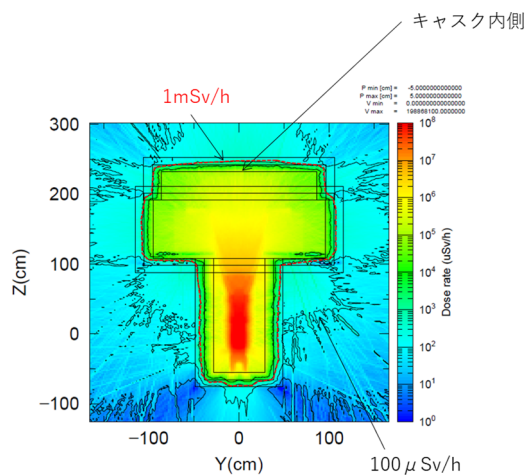


Figure 3-12、遮蔽キャスクにおける線量分布計算

3.10. 遮蔽評価

遮蔽体は、人の被ばくを低減するために必要不可欠なものである。Figure 3-13 は、中性子ステーションの遮蔽計算を行ったものである[13]。つバルクでの線量は十分低いですが、シャッター上部や中性子ビーム孔など空隙がある部分では、線量が高くなるのが分かる。このように、3 次元的な遮蔽計算を行い、必要な厚さ、材質、構造を決めていった。

Figure 3-14 は、中性子実験装置の遮蔽計算の計算モデルの一例、Figure 3-15 はその線量分布

の計算結果である[8]。中性子実験装置と上流側遮蔽体の隙間から少し放射線が漏れ出していることが分かる。ビームストップや通路では、十分に遮蔽できていることも分かる。

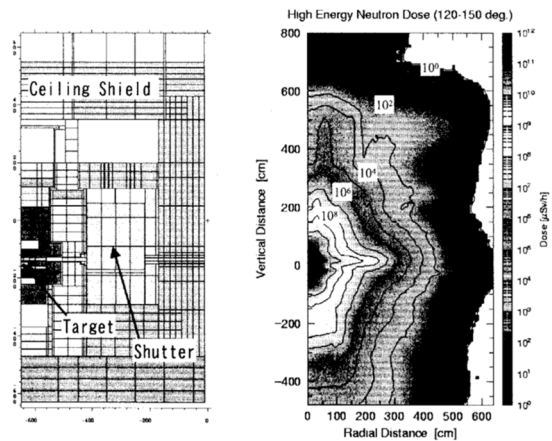


Figure 3-13、中性子ステーションの遮蔽評価[13]

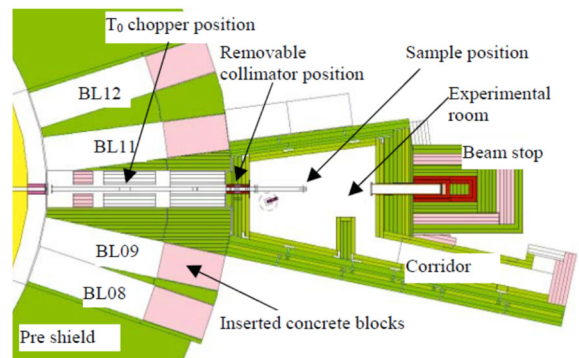


Figure 3-14、中性子実験装置における遮蔽計算の計算モデル[8]

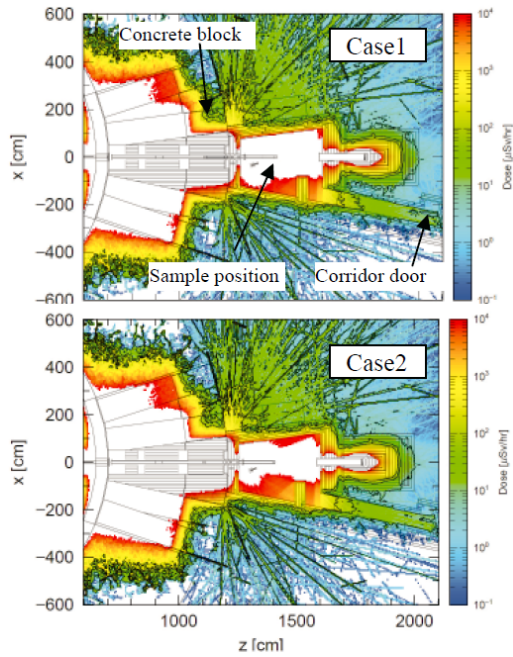


Figure 3-15、中性子実験装置における遮蔽評価 [8]

3.11. キャビテーション損傷

キャビテーション損傷は、液体である水銀を使用する場合には免れない。陽子ビームが入射した水銀は発熱を生じ、圧力波を生じる。圧力波が壁面に達した後、逆に負圧になりキャビテーション損傷が生じる。キャビテーション損傷は、負圧になった際に、水銀がジェットのように噴出し、壁面に損傷を与えるものである。

Figure 3-16 は、アメリカの核破砕中性子源ある SNS においてターゲット容器壁面に観測されているキャビテーション損傷である [14]。このように、壁面に孔食を生じさせるほどの損傷が生じる。

J-PARC の核破砕中性子源では、同様な問題が発生する可能性があったため、Figure 3-17 のように [15]、ターゲット容器を二重化し、水銀中にヘリウムガスバブリングを行うことで、キャビテーション損傷の低減・対策を行っている。Figure 3-18 に示すように [15]、現在までに、容器を貫通するような損傷は発生しておらず、水銀漏洩事象は発生していない。

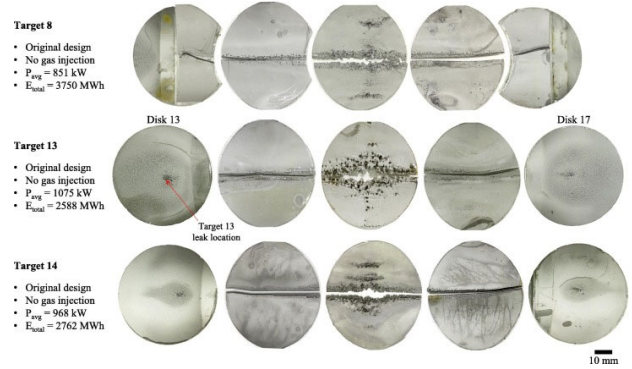


Figure 3-16、SNS におけるキャビテーション損傷 [14]

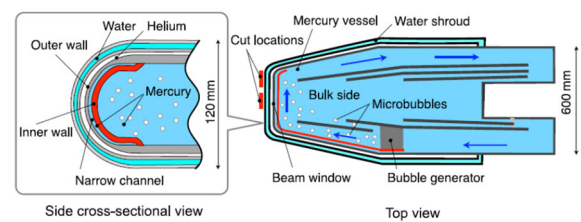


Figure 3-17、ターゲット容器の二重化とバブリング [15]

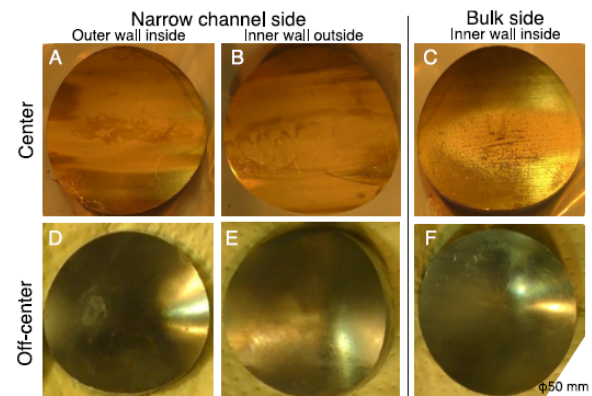


Figure 3-18、J-PARC でのキャビテーション損傷の様子 [15]

3.12. 遠隔操作

水銀ターゲット容器は、高度に放射線損傷を受けるために、1年に1回、交換する必要がある。同時に高度に放射化するために、直接人の手で交換することは困難である。そのため、負圧管理をしたホットセルを設置し、その中で、水銀ターゲットの交換ができるような遠隔操作機器を備え

ている。Figure 3-19 は、遠隔操作機器の一つであるパワーマニピュレーターの写真である[4]。遠隔で移動することができ、遠隔でボルトの開け閉めをすることが出来る。

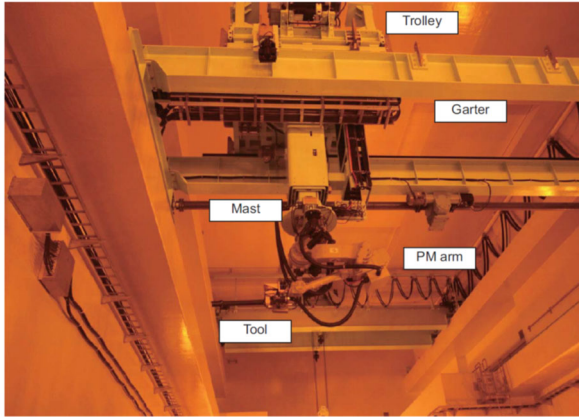


Figure 3-19、パワーマニピュレーター[4]

3.13. ターゲットの最適化

Figure 3-20 にターゲットの最適化の例を示す[16]。ターゲットは材質によって強度が違だけでなく、陽子ビームのエネルギーによって、強度と位置が異なる。そのため、パラメータを振ることで、最適な位置を見つけ出す必要がある。

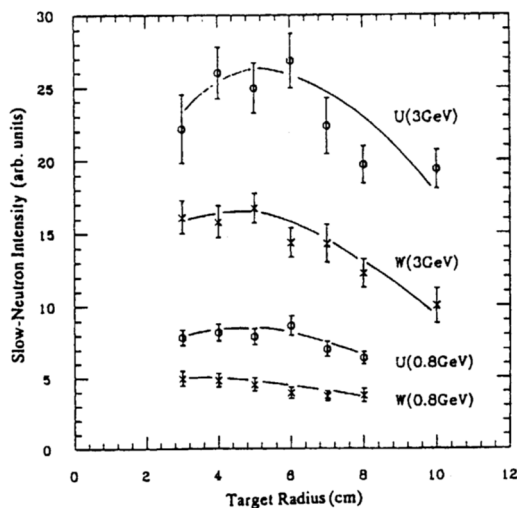


Figure 3-20、ターゲットの直径、材質、エネルギーと漏洩する熱中性子強度の依存性[16]

3.14. 減速材の最適化

中性子特性に大きく影響を与える減速材の最適化は、重要である。Figure 3-21 は、結合型減速材のサイズ依存性を示したものである[17]。減速材サイズが大きいほど、中性子強度が高くなるが、ある程度のサイズからは大きな増加が見られないことが分かる。Figure 3-22 は、中性子パルスのポイズンの位置依存性を示したものである[18]。ポイズンの位置が大きくなるほど、中性子強度は増加するがパルス幅も増加する。Figure 3-23 は、非結合型減速材のサイズ依存性を示している[19]。厚さ 6.2cm あたりで頭打ちになっていることが分かる。

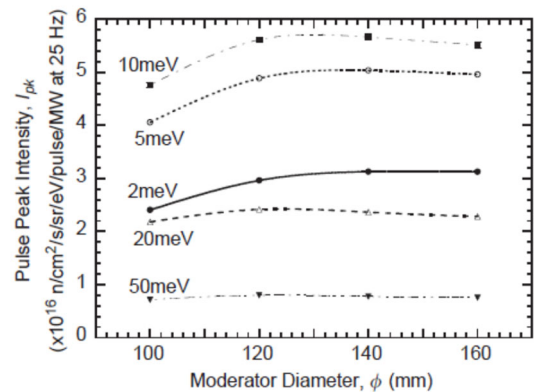


Figure 3-21、結合型減速材のサイズ依存性[17]

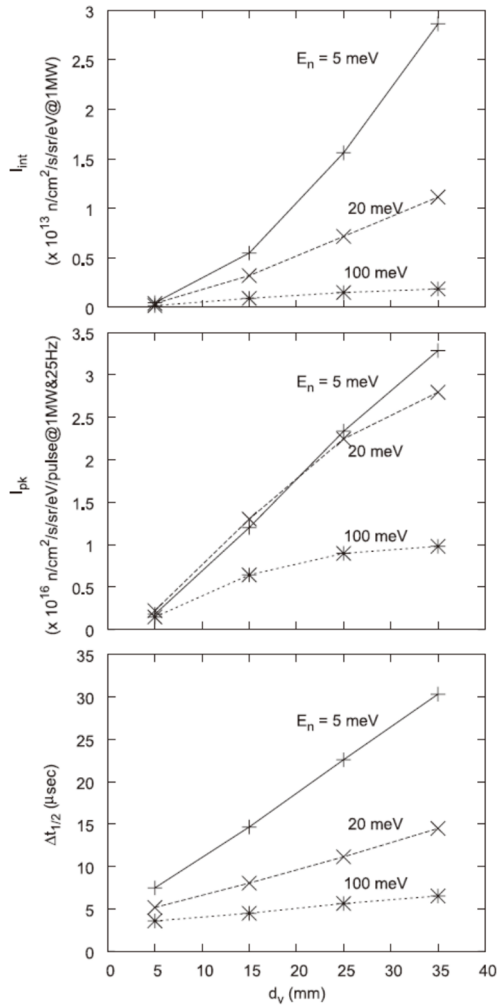


Figure 3-22、ポイズンの位置と中性子パルス特性 [18]

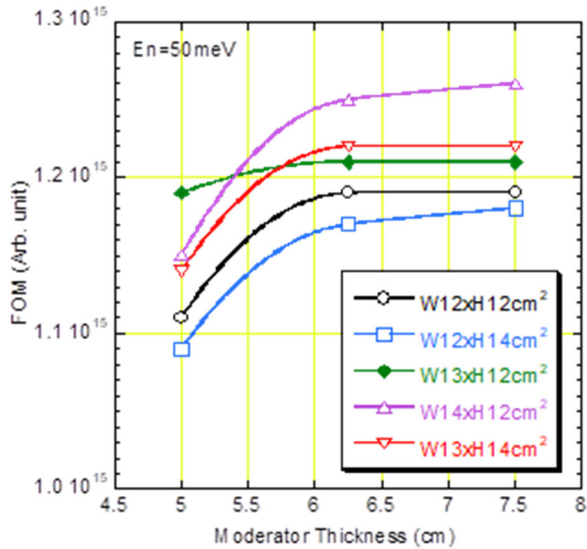


Figure 3-23、非結合型モデレータのサイズ依存性 [19]

3.15. 簡素化形状と工学形状

中性子強度やパルス計算では、簡素化モデルと工学モデルとを使い分けている。簡素化モデルではパラメータの設定しやすいため、パラメータを設定する際に使用する。一方、工学モデルは、実状に合わせたもので、絶対値を決める際には必要となる。Figure 3-24 には、非結合型モデレータの中性子スペクトルの違いを示す[20]。簡素化モデルと工学モデルとでは、中性子スペクトルの形状は変わらないが絶対値に違いが見える。これは、工学モデルには、容器や材料、空間など、中性子の強度を落とす要因が入っているためである。Figure 3-25 は中性子パルスの違いを示す [20]。簡素化モデルと工学モデルとでは、パルスのテールに違いが見える。これは、溶接による中性子吸収材の欠損が存在するからである。

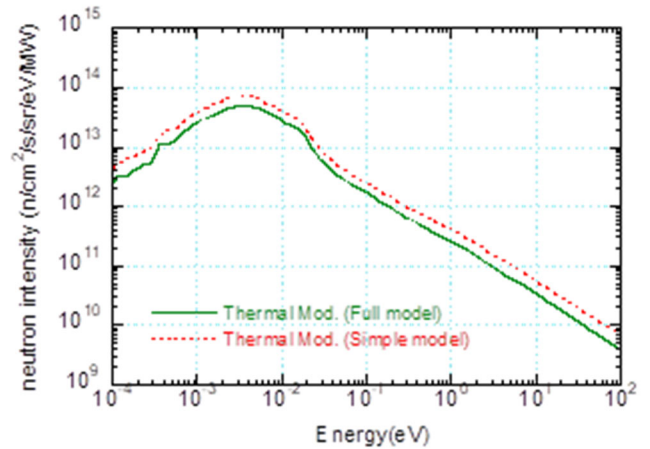


Figure 3-24、非結合型モデレータでの中性子スペクトルの違い [20]

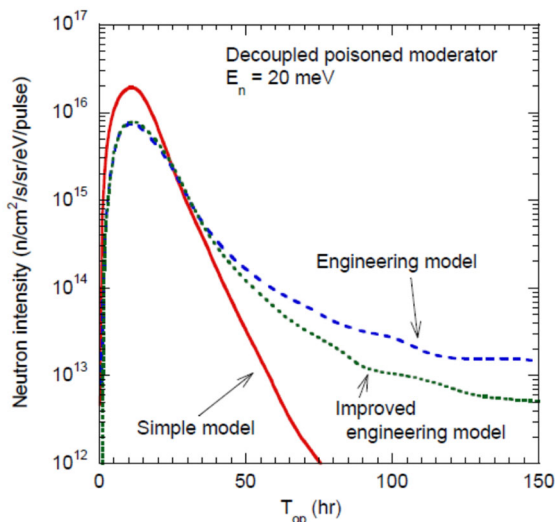


Figure 3-25、パルス特性の違い [20]

4. まとめ

物質科学研究や生命科学で有効なプローブである中性子を使用する中性子施設は、小型化されている X 線装置や大強度・高輝度化が期待できる放射光施設と比べ、追いつけない部分がある。それでも、強力なツールとなるように中性子生成に関する技術開発が進められている。国内外の施設では、新規の核破砕中性子源の計画や建設が進められている。また、国内で新たな研究炉の設置計画が立ち上がっている。これらが中性子科学の未来を作っていくものである。

本テキストが、中性子生成ターゲットを理解する一助となることを期待する。

参考文献

[1] M. Harada, et al., “Application and Validation of Particle Transport Code PHITS in Design of J-PARC 1 MW Spallation Neutron Source”, Prog. Nucl. Sci. Technol. 2, (2011) 872-878

[2] K.H. Andersen and C.J. Carlile, “A Proposal for a Next Generation European Neutron Source”, J. Phys.: Conf. Series **746** (2016) 012030.

[3] Home page of ISIS Neutron and Muon Source: URL: <https://www.isis.stfc.ac.uk/Pages/home.aspx>.

[4] Neutron Source Section, “Technical Design Report of Spallation Neutron Source Facility in J-PARC”, JAEA-Technol. 2011-035 (2012)

[5] R. Garoby, et al., “The European Spallation Source Design”, Phys. Scr. 93 (2018) 014001.

[6] A.V. Daniel, et al., “Neutron Production in Lead Target by High-Energy Light-Mass Heavy Ions”, JINR-1-92-174 (1992).

[7] “原子炉工学大要”, 長谷川 修 他、養賢堂、1977 年発刊

[8] M. Harada, et al., “Shielding Design of a Neutron Beam Line “NOBORU” at JSNS/J-PARC”, Prog. Nucl. Sci. Technol., 1 (2011) 94-97.

[9] Home page of J-PARC MLF: URL: <https://mlfinfo.jp/ja/blmap.html>, as of July 2023

[10] T. Sato, et al., “Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02”, J. Nucl. Sci. Technol. 55, (2018) 684-690.

[11] 物質・生命科学実験施設建設チーム, “大強度陽子加速器プロジェクト 物質・生命科学実験施設機器技術設計書”, JAERI-Tech 2004-001, JAERI (2004).

[12] M. Harada, et al., “DPA calculation for Japanese spallation neutron source”, J. Nucl. Mater. 343 (2005) 197-204.

[13] F. Maekawa and M. Tamura, “3-D shielding calculation method for 1-MW JSNS”, Proc ICANS-XVI, Düsseldorf-Neuss, Germany (2003) 1051-1058.

[14] D.A. McClintock, et al., “Small-bubble gas injection to mitigate cavitation-induced erosion damage and reduce strain in target vessels at the Spallation Neutron Source” Materials & Design, 221 (2022) 110937.

[15] T. Naoe, et al., “Mitigation of Cavitation Damage in J-PARC Mercury Target Vessel”, Proc. 14th IWSMT, JPS Conf. Proc 28 (2020) 081004.

[16] 渡辺 昇, “核破砕中性子源工学概論”, JAERI-Review 2000-031, JAERI (2000).

[17] T. Kai, et al., “Neutronic performance of rectangular and cylindrical coupled hydrogen moderators in wide-angle beam extraction of low-energy neutrons”, Nucl. Instr. Meth. A 550 (2005) 329-342.

[18] M. Harada, et al., “Neutronics of a poisoned para-hydrogen moderator for a pulsed spallation neutron source”, Nucl. Instr. Meth. A574 (2007) 407-419.

[19] M. Harada, et al., “Optimization of decoupled hydrogen moderator”, Proc ICANS-XV, Tsukuba, Ibaraki, Japan, JAERI-Conf, JAERI (2001) 793-807.

[20] M. Harada, et al., “Deterioration of pulse characteristics and burn-up effects with an engineering model in Japanese Spallation Neutron Source”, Proc ICANS-XVII, LA-UR-06-3904, LANL 2 (2006) 700-709.