

RESA と匠の連携について

本資料は、日本原子力研究開発機構の JRR-3・J-PARC 中性子実験装置整備計画検討作業グループがまとめた資料「JRR-3 と J-PARC/MLF における中性子実験装置の役割分担と連携及び JRR-3 の中性子実験装置に関する将来計画（全154ページ）」のうち、「3.9 中性子工学回折装置（p.111～p.132）」を抜粋したものです。

3.9 中性子工学回折装置

3.9.1 はじめに

中性子工学回折装置とは、様々な材料をいろいろな加工技術によって組み立てた工業製品について、製作時や動作時、動作環境において、材料やマイクロ構造の変化を明らかにして、材料と加工技術の開発や、工業製品の開発と品質検査に利用するための装置である。材料そのものの検査及び研究開発の目的のためには、多数存在する様々な物質研究用の測定装置が利用可能である。一方、加工、組み立て後の製品、もしくはその一部を検査するためには、中性子マイクロビームが利用される。いかに測定領域(ゲージ体積と呼ばれる)を小さく絞れるか、製品中の知りたい位置とそれに対する応力方向かは、装置性能を議論する上で非常に重要なファクターである。十分高い測定分解能を維持したままゲージ体積を小さくするためには、シグナル強度、すなわち測定効率も要求される。

中性子工学回折装置を用いて明らかにできる情報は、

- (1) ひずみ及び得られたひずみから計算される応力
- (2) 微小領域の結晶構造、不純物の種類や量の同定
- (3) ミクロ組織構造の評価

以上の3点である。このような目的のために、JRR-3 に中性子残留応力解析装置 RESA 及び、2007 年からは RESA-II が設置され、これら2台の装置は基礎・応用両面からの研究と JRR-3 における産業利用の主要な部分を担ってきた。さらに J-PARC/MLF において工学材料回折装置「匠」が建設され、2008 年5月よりコミッショニングを開始する。J-PARC/MLF の出力が実用的な 0.1MW を越える 2010 年秋までは、国内では JRR-3 の RESA 及び RESA-II の2台の装置が中性子工学回折装置として利用可能であり、現在拡大する一方の中性子による工学回折測定の需要を考えると、この2台の存在意義は極めて高い。

匠は基本的にパルス中性子を用いた粉末回折装置であるために利得は大きい。定常中性子及びパルス中性子を用いた装置はそれぞれ特性が異なるため、その個性を生かした使い分けが重要である。次節では、RESA と匠の役割分担を述べる前に、我国唯一の中性子残留応力回折装置 RESA がこれまで切り拓いてきた研究分野及び産業利用の動向ならびに今後の利用の拡大状況について述べる。

3.9.2 中性子工学回折装置による基礎及び応用研究、産業利用の現状と今後の展望

(1) RESA が切り拓いてきた研究課題

原子力機構中性子応力測定装置 RESA は、1993 年に建設された応力測定専用の中性子回折装置である。RESA 誕生から平成 2003 年までの 10 年程の間は、Si ベント集光モノクロメータの開発等の装置高度化、VAMAS TWA20(The Versailles Project on Advanced Materials and Standards, Technical Working Areas 20, Stress Measurement by Neutron)の中性子応力測定国際標準化に係る標準サンプル持ち回り測定による各国装置の性能検証実験への参加、ITER(国際熱核融合炉)の Ni 基調合金超伝導コイル被覆管の応力誘起粒界酸化(SAGBO; Stress Assisted Grain Boundary Oxidation)問題に関する研究、日本材料学会

中性子応力測定標準の制定に向けたデータベース(回折弾性定数)作成のための基礎実験等の独自研究、鋼の高強度化のメカニズムの解明及び集合組織観察、鋼の疲労と応力緩和機構の解明、中性子 IP を使った応力測定法・評価法の開発等の大学との協力研究を行ってきた。産業界との共同研究では、曲げ加工した鋼板やピーニング処理鋼の内部応力分布測定(日立製作所)、自動車エンジンプロック内部応力分布測定(トヨタ自動車)等が早い段階で行われた。ただこの間の産業界の利用は、今日程の需要が殺到している状況ではなく、独自研究や協力研究に比べまだごく少数であった。少し話が逸れるが、産業界の利用がこの間それほど活発にならなかった背景には、産業界へのアピールがいまひとつ不足し広く浸透させられていなかったこと等、いくつか理由があると考えられる。共同研究という唯一のチャンネルを介さなければ装置が使えなかったこと、研究開発目的以外(利用する会社自身の商業目的)での利用ができなかったこと等、やや敷居が高かったこともその理由の一つとして挙げられよう。

2003年に入るとそれ以降、RESAを取り巻く状況は大きく変わった。同年11月に開始されたRESAの共同利用への開放、続く原研とサイクル機構の統合に伴う施設共用制度がそれである。これについては後述するとして、まずは、この時期以降に行われた研究を以下に紹介してみたい。

まず、独自研究について主だった研究成果を挙げると、第2種ひずみ(塑性ひずみ)の影響を考慮した高精度測定法・評価法を開発した他、応力腐食割れ対策として原子力機器に施されるレーザピーニングをした鋼材の表面層から内部までの応力分布を明らかにした研究、鋳物製品等の粗大粒を有する材料の応力測定法・評価法の開発等、工業製品の力学的健全性評価に必須な測定技術の開発において良い成果が生まれている。大学との共同研究では、吊橋ケーブル等に用いられる高強度伸線鋼の強度発現メカニズムの解明に関する研究や材料のマイクロ組織因子(転位密度、ブロックサイズ等)のプロファイル解析による定量評価法の開発等、材料プロセスのために欠かせない金属工学分野の研究の他、機械材料分野の重要なテーマである、材料の疲労や損傷に関した、ECAP(Equal-Channel Angular Pressing)材の強度発現機構の解明、形状記憶合金のき裂周辺部の応力誘起マルテンサイト変態領域の定量観察等の研究が行われた。また、J-PARCに係る研究開発も行われた。匠の設計や以下に述べるRESA高度化につながったラジアルコリメータの試作機の実証試験、中性子源であるステンレス水銀ターゲット容器の応力測定を行って容器の強度設計に必要な知見取得に貢献した。

また、ここ1、2年のごく最近では、実機の大型構造物(500A 原子力配管)の高精度応力測定法開発を行うため外部競争資金を獲得し、それに必要なRESAの高度化(ゴニオメータ等の大型化、高輝度モノクロメータの開発・導入、ラジアルコリメータ及び1次元検出器の導入による高測定効率化)を実施した他、他機関や内部拠点連携、例えば、次世代原子炉システム開発研究部門との「FBR(高速増殖炉)の蒸気発生器の構造最適化に関する開発研究」や「FBRのナトリウム循環系配管溶接部の経年劣化評価に関する研究」も外部資金を獲得する等して積極的に進めている。非晶質系の材料(例えば、金属ガラス)の応力測定法・評価法の開発にも取り組み始めたところである。さらに、RESAの高度化で余剰となったゴニオメータ等の構成機器を有効利用し、2号機RESA-IIを立ち上げ(2007年度下期)、2003年以降産業利用の需要の年毎の増加によって問題化してきたマシンタイム不足をできるだけ解消する等の装置整備、新たな工学材料研究のための各種アクセサリ(試料高温装置及び冷凍機等)の整備等も行っているところであり、中性子回折の工学への応用のさらなる発展に地道な努力を続けている。表3.9.2.1に、RESAでこれまで行われた研究課題についてまとめた。

表 3.9.2.1 これまで RESA で行われた主な研究開発課題

測定技術に関する課題	<ul style="list-style-type: none"> ● 中性子 IP を使った応力測定法・評価法の開発等 ● 第 2 種ひずみの影響を考慮した高精度測定法・評価法の開発 ● 鋳物製品等の粗大粒を有する材料の応力測定法・評価法の開発
工業製品の健全性評価及び材料工学に関する課題	<ul style="list-style-type: none"> ● ITER Ni 基調合金超伝導コイル被覆管の応力誘起粒界酸化に関する研究 ● 鋼の高強度化のメカニズムの解明及び集合組織観察 ● 鋼の疲労と応力緩和機構の解明 ● 曲げ加工した鋼板やピーニング処理鋼の内部応力分布測定 ● 自動車エンジンブロック内部応力分布測定 ● レーザピーニング鋼材の内部応力分布測定 ● 高強度伸線鋼の強度発現メカニズムの解明に関する研究 ● 材料のマイクロ組織因子(転位密度、ブロックサイズ等)のプロファイル解析による定量評価法の開発 ● ECAP 材の強度発現機構の解明 ● 形状記憶合金のき裂周辺部の応力誘起マルテンサイト変態領域の定量観察 ● J-PARC 核破砕中性子源ステンレス水銀ターゲット容器の応力測定 ● 実機の大型構造物の高精度応力測定法開発 ● FBR 蒸気発生器の構造最適化に関する開発研究 ● FBR のナトリウム循環系配管溶接部の経年劣化評価に関する研究
装置技術開発に関する課題	<ul style="list-style-type: none"> ● Si ベント集光モノクロメータの開発 ● J-PARC 匠用ラジアルコリメータ試作機の実証試験 ● 非対称 Si ベントモノクロメータの開発
その他の課題	<ul style="list-style-type: none"> ● 中性子応力測定国際標準化に係る標準サンプル持ち回り測定 ● 日本材料学会中性子応力測定標準データベース作成基礎実験

(2) 産業利用の現状と今後の動向

さて、産業利用の状況について以下に述べてみたい。2003年からRESAの産業利用を取り巻く状況は大きく変わったということは、上で既に述べた。同年11月の共同利用化と2005年10月の原研とサイクル機構統合後の施設供用という新しい利用制度が導入されたこと、中性子利用技術移転推進プログラム(文科省委託事業)による施設供用制度とは別の枠組みでの利用制度が導入されたことの2つである。図3.9.2.1に示すように、これら新利用制度の導入により、産業利用の需要は一気に激増した。

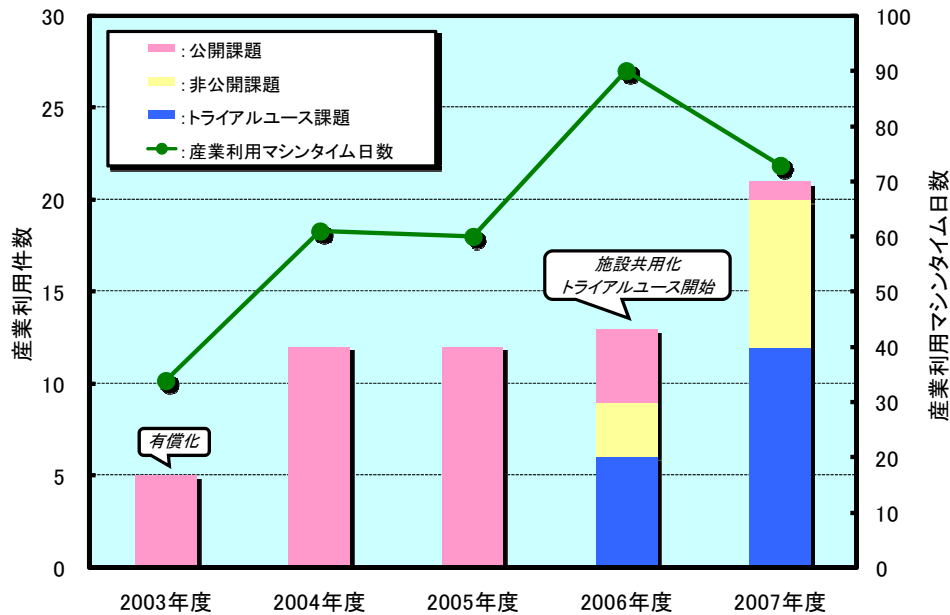


図 3.9.2.1 RESA・RESA-IIにおける中性子ビーム利用の推移

RESAに関して言えば、これ以降、年間マシントイムの40%以上が産業利用で占められるまでになっている。その実績を個別に全て詳しく紹介することはできないが、主だったところを次に紹介する。産業利用においてこれまでの実績から利用者の業種別にできるだけ細かく分けると、原子力等プラント機器製造、自動車及び自動車部品製造、輸送機械製造、建設機械製造、鉄鋼等素材製造、検査サービス、その他である。さらに、主な課題別で分けると、製造加工プロセスで生じた製品中の応力やその除去処理の妥当性評価に関する課題が多く、ここ最近では、溶接構造物の応力測定が非常に目立っている。ついで、複数社の実績がある課題としては、表面改質材の応力測定で、自動車や輸送機械製造メーカーの浸炭した動力伝達部品(自在継手、ギヤ等)が挙げられる。また、異色などところでは、これまで接点すらなかった土木建築関連の課題(鉄筋コンクリートの鉄筋の応力測定)も世界で初めて実施して良い結果が得られている。一方、企業による中性子利用の他に、中性子応力測定業務を請け負う検査会社の参入により、中性子産業利用に対する支援体制も整備されつつある。有料で測定を請け負う、あるいは、専門家を派遣するサービスであり、原子力機構の施設共用制度では実現できなかったメールインサービス等も視野に入れた測定支援が計画されている。本サービスが全国展開することで、潜在的なニーズの掘り起こし等、産業利用の益々の発展が期待できる。

最後に、RESAの今後の利用動向であるが、研究開発分野については、中性子応力測定技術の高度化を目指した開発研究が継続するとともに、実機稼働中あるいは溶接施工中等におけるIn-situ応力測定技術の開発研究や高温、低温環境中におけるIn-situ材料評価研究等が発展すると考えられる。一方、産業利用については、需要は伸びてゆくものと思う。というのは、例えば、図3.9.2.2に示すように、自動車エンジンの測定一つとっても複数のメーカーが存在する。すなわち、企業の実機部品の測定では原理原則を追求する基礎研究と異なり、材料や製造条件が少し異なるだけでもその影響を定量的に明

らかにする必要があるため、一つの企業でも製品開発のたびに測定が必要となる。したがって、同じ試験体の課題といえども多くの潜在的需要が存在する。この構造は利用者の業種の如何によらない。すなわち、自己相似形が無数に連続するフラクタルな構造を成す。RESAでの産業利用は、まだこの構造の一部分をトレースしている途中で、これを如何に掘り起こしていくかということ、また、この後の3.9.4で触れられることになる利用料金が利用者にとってリーズナブルかどうかとも利用拡大の鍵となる。

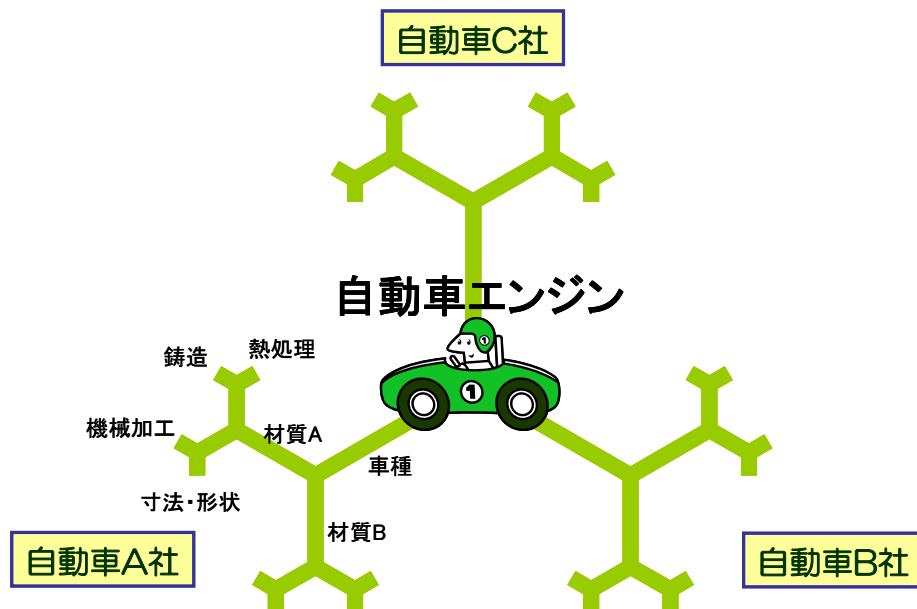


図 3.9.2.2 中性子工学回折装置における産業利用課題が成すフラクタル構造の一例

3.9.3 中性子工学回折装置における JRR-3 と J-PARC の役割分担と連携

JRR-3 の中性子工学回折装置 RESA と J-PARC の匠の役割分担について、3.9.1 で述べた本装置の用途毎に詳細に記述する。

(1) ひずみ及び得られたひずみから計算される応力
ひずみ及び応力測定を論ずる上で重要な項目は、

- a) ひずみ測定精度
- b) ゲージ体積
- c) 測定効率

以上の3点である。それ以外の項目、例えば試験体の大きさや重量、利用可能なアクセサリ、測定可能な温度、外場等測定環境については、JRR-3 の RESA と J-PARC の匠の間に特に顕著な違いはない。もう一つ残った顕著な相違は、利用料金である。これは装置性能といった技術的な観点とは異なるが、産業利用のための装置としてコスト減に寄与する上で、利用料金は重要な項目である。利用料金については3.9.4において述べる。

a) ひずみ測定精度

RESA と匠のひずみ測定精度とゲージ体積について、図 3.9.3.1 に示した。また比較のために実験室系(または移動式)の X 線と、放射光による X 線ひずみ回折装置、英国ラザフォード・アップルトン研

究所 ISIS 施設のパルス中性子応力測定装置 ENGIN-X についても表示した。中性子及び X 線回折を利用したひずみ測定装置の最大の利点は、非破壊でひずみ解析及びひずみ分布の測定が行えることである。一方、同図に示したひずみゲージによるひずみ測定は、試験体を切り刻む破壊法である。ゲージを貼付した箇所以外の周辺部分を切り落として応力を解放し、残った縦 5mm 横 5mm 高さ 3mm 程度の小片についての平均的なひずみを計測することができる。そのひずみ測定精度 $\pm 0.001\%$ である。なお、ひずみゲージ法は測定試料の材料が軟らかい程ひずみ測定精度が低下することが知られている。

RESA の標準的なひずみ測定精度 $\pm 0.015\%$ はひずみゲージのそれよりも悪いが、条件によっては $\pm 0.01\%$ 程度も実現できており、十分利用可能である。一方で匠の 90° バンクによる測定では、高分解能モードで $\pm 0.0075\%$ 、低分解能モード(高強度モード)で $\pm 0.02\%$ と、これもひずみゲージには及ばないものの、精度 $\pm 0.015\%$ 及び $\pm 0.0075\%$ は、試験体が鉄鋼材料の場合でそれぞれ $\pm 30\text{MPa}$ 及び $\pm 15\text{MPa}$ 程度の精度で応力評価が可能であることに相当し、工業上実用的な精度である。実験室系の X 線装置ともほぼ同等で十分利用に適する。

これ以上のひずみ測定精度としては、放射光を用いた場合に $\pm 0.0015\%$ と非常に高い精度が実現しているが、中性子の場合には J-PARC の匠に後方散乱の検出器バンクを新設することによってより分解能を向上させることができる。シミュレーションにより散乱角 150° 程度の後方散乱用検出器バンクの設置によってひずみ測定精度を $\pm 0.005\%$ よりも向上できることが明らかにされている。しかし、それでも放射光の場合のひずみ測定精度には及ばず、しかも後方散乱を利用した場合にはゲージ体積を小さく定義するには不利な幾何学条件となるが、中性子の持つ大きな透過力(入射側及び散乱側両方合計のパス長で 50mm 程度)は中性子後方散乱による測定条件を非常に魅力的にしている。

このようにひずみ測定精度を向上させられる点は J-PARC/MLF の匠の優位な点である。Day One の時点では匠には後方散乱用検出器バンクは設置されないが、将来的には設置する方向で計画検討されている。

結論的に言って、RESA 及び匠両者ともに十分実用的なひずみ測定精度を実現しているが、今後より高いひずみ測定精度を目指すならば匠である。

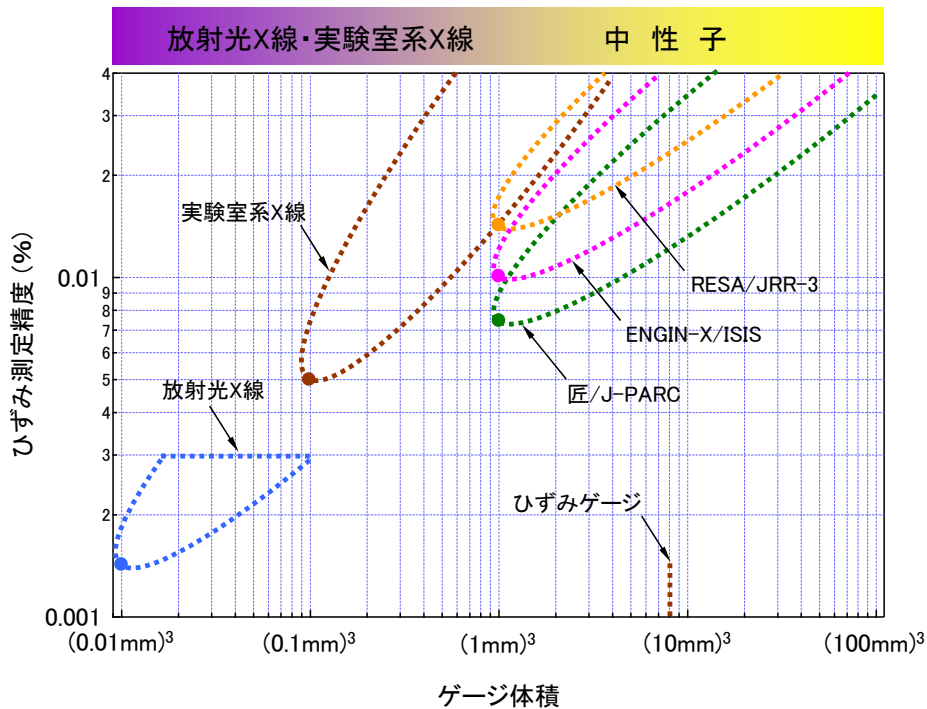


図 3.9.3.1 各種 X 線及び中性子回折装置におけるひずみ測定精度とゲージ体積

b) ゲージ体積

ゲージ体積は、図 3.9.3.2 に示したように、①入射中性子を 4 象限スリットで絞り、②検出器の前にラジアルコリメータや 4 象限スリットを設置して、散乱中性子を捉えることができる試験体の体積を制限する、この組み合わせによって定義される。結論的に言えば、RESA と匠両者の間に顕著な違いは存在しない。

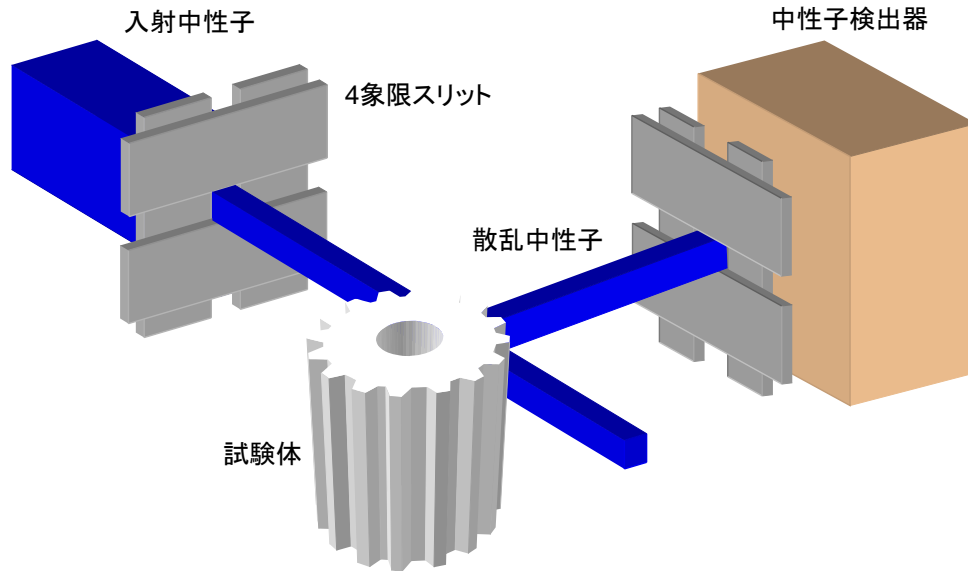


図 3.9.3.2 4 象限スリットによるゲージ体積の制限

RESA の場合、検出器、モノクロメータともにサイズが小さく、自由度に富む。4 象限スリットを極力試験体に近接させることで入射及び散乱中性子どちらについても一辺を 1mm 以下に絞り込むことが可能である。今までの経験では一辺を 0.3mm にまで絞った場合があった。ただし十分なシグナル強度を得るためにゲージ体積は 1mm³ 程度確保したが、これは後述するようにモノクロメータを改造して入射中性子束を増加させることで今後さらに改善の余地がある。RESA でラジアルコリメータを使用した場合においても、幾何学的制約の容易さから、一辺 0.5mm 程度まで中性子を絞り込むコリメータが製作されていて実用に供されている。結論的に言えば、RESA は装置の構造が簡単のために、様々な大きさや形のゲージ体積を入射及び散乱中性子双方の形状を比較的自由に制限を加えることでコントロールすることができる。

一方匠においては、1.1m×1.4m の大型の 90°検出器バンク全体で捉えたシグナルを積算することで検出効率を上げているため、この検出器全面をカバーするラジアルコリメータが必要となる。その製作には高額な費用が必要であり、経年変化、着脱交換時の再現性・信頼性についても、今後経験を要する。Day One 装置の匠のコミッショニング時(2008年10月)には、2mm ゲージ幅のラジアルコリメータが準備されているが、今後、引き続き 1mm, 3mm 及び 5mm ゲージ幅用のコリメータが製作されていく計画である。また、匠においても、RESA での 0.5mm ゲージ幅のラジアルコリメータの製作実績からみて、同等のゲージ幅のラジアルコリメータを製作することは技術的には可能である。さらに、入射中性子との組み合わせによって、0.1mm³ 程度のゲージ体積を実現することも幾何学上は可能である。これは J-PARC が立ち上がった後に検討していく価値のある課題である。

ゲージ体積は測定効率と切り離れた議論を行うことはできない。ゲージ体積を小さくするならば比例してシグナル強度が減少する。強度を犠牲にしてもバックグラウンドが十分小さければ、測定時間さえ長くすればデータの取得が可能である。現実的な測定時間で試験体からのシグナルが装置のバックグラウンドによる統計誤差程度より強ければ測定可能であるが、シグナルがノイズの統計誤差に埋

もれると検出することが困難になる。そうして装置の能力が決まり、装置の能力を超えたゲージ体積における測定は不可能である。装置の標準的な性能については、入射中性子束や検出器サイズ、エネルギー分散法による利得等ある程度予測可能な事柄で議論することが可能であるが、装置の限界を論じる上では、装置のバックグラウンド等、定量的に扱うことが難しく、予測困難な現象を考慮に入れなければならない。理想的には遮へいが十分であれば JRR-3 と J-PARC のバックグラウンドには顕著な違いは生じないと期待されるが、定常の TOF の測定原理の違い、単色と白色、原子炉と核破砕中性子源の違い、検出器原理と面積の違い等、様々な要因があるので、現時点ではゲージ体積がより小さな測定を実現できるのはどちらの装置か明らかではない。

c) 測定効率

測定効率については、入射中性子束と、計数効率を比較検討する必要がある。ひずみ・応力測定に用いられる熱中性子の波長帯域における JRR-3 の時間平均中性子束は非常に強く、J-PARC/MLF の出力が 1MW の場合と比較しても 10 倍以上大きい。実際、匠の試料位置における熱中性子束は波長帯域 0.08nm から 0.43nm において、高分解能モードで $2.2 \times 10^7 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 、低分解能モードで $4.8 \times 10^7 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ であり、RESA が設置されている T2-1 実験孔の白色中性子束 $4 \times 10^8 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ と比較してかなり小さい。ただし匠は、利用する中性子のパルス当りの瞬間中性子束が大きくかつ検出器の覆う立体角が大きいため、上記の RESA との中性子束 10 倍の差を補う 2 桁の測定効率増になる。しかしながら、0.1MW の運転出力が達成され、実用的な強度が期待される 2009 年夏以降までは、例え匠が瞬間中性子束と検出器立体角が大きいといえども、JRR-3 との間に時間平均中性子束で 100 倍以上の差が存在することから、J-PARC/MLF のフルパワー達成の 2012 年までのこれから 4 年間は、JRR-3 の RESA のみが実用的装置として利用可能な状況が継続する。基礎・応用両面からの研究開発試験、産業利用分野と利用者の拡大のために JRR-3 が果たすべき役割は大きい。

匠の特長は、大型の検出器バンクと TOF 法によって白色中性子を有効に利用できる点である。基本的には粉末回折実験を行うためにパルス中性子の利用の利得は大きい。ただし、J-PARC/MLF に設置される粉末構造解析専用装置(S-HRPD や iMateria 等)と比較すれば検出器の覆う立体角が 1/10 程度であることを反映して、それらの粉末回折装置よりは利得は期待できない。匠では指数の異なる複数のピークを同時に捉えることができるため、複数ピークの解析によってひずみを単一ピークの測定よりも統計精度を高めて求めたり、応力の面指数依存性を一度に明らかにすることができる。複数ピークの測定は RESA では散乱角や中性子の波長、場合によってはモノクロメータを交換する等、測定条件を変える必要があるために、匠のほうがより効率が良い。

特定の指数を持つ単一ピークの測定によるひずみ・応力測定を行うことが RESA の最大の用途であるが、その場合ひずみ測定精度を悪化させずに入射中性子束、すなわちシグナル強度を増加させる巧妙な測定方法が存在する。それは試験体の着目する格子面間隔とできるだけ等しい結晶を用いて、図 3.9.3.3 のような集光モノクロメータを用いて実験する方法である。この場合、集光する中性子はモノクロメータによる散乱角が異なるためにそれぞれの場所で中性子エネルギーが異なる。しかし、図 3.9.3.4 に示すように(+,-)配置の RESA では、試験体からの散乱方向が中性子のエネルギー分散に無関係となるため、散乱線幅、すなわちひずみ測定精度を悪化させることなく入射中性子のエネルギー帯域を増やして中性子束を増加させることができる。現在の RESA の試料位置での中性子束を 10 倍以上増加させ、 10^7 程度にすることは十分実現可能である。これは匠の白色中性子束にほぼ匹敵するため、匠と比較できるほどの測定効率を実現できる。単色中性子による実験の平易の他、装置の利便性や様々な実験条件に細かく対応できることの意義は非常に大きい。試験体の着目する指数の結晶面間隔とモノクロメータ結晶の結晶面間隔が同じ場合は、散乱中性子はモノクロメータ上流の白色中性子と平行方向に散乱される。特にモノクロメータ結晶及び試験体による散乱角がほぼ 90° となるエネルギーを選択すれば、デバイ・シェラーリングによる散乱角のずれもなく、ゲージ体積を定義するスリットの配置も容易である。

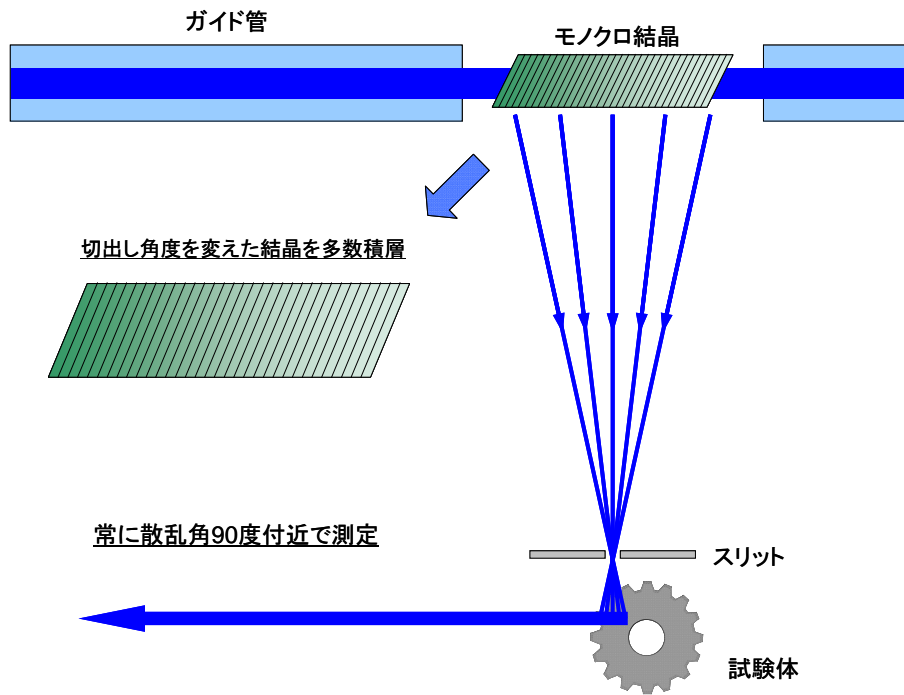


図 3.9.3.3 RESA 用大強度集光モノクロメータの概念図

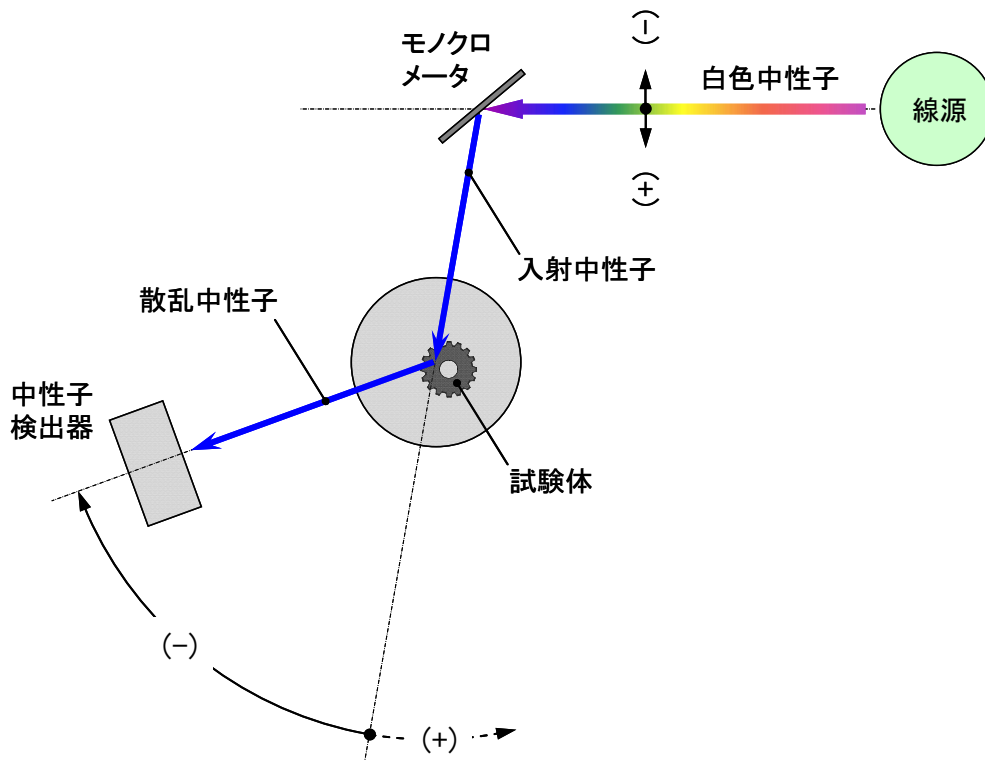


図 3.9.3.4 RESA の散乱ジオメトリ

このような大強度集光モノクロメータによって利用する入射中性子のエネルギー帯域を増やすことは、匠とは若干意味合いが異なるが白色中性子の有効利用の観点では等価である。特に同じ検出器の上にシグナルが集中する実験配置は、S/Nの観点から匠よりも有利な場合が生じうる。

RESAでは ^3He 検出器を使用しており0.18nmの中性子に対し70%程度の検出効率、匠ではZnSシンチレーション検出器と検出方式が異なるが、0.1nmの熱中性子に対して60%程度の検出効率である。 γ 線に対する感度は両者とも 10^6 程度と大差はない。またダイナミックレンジや計数エレクトロニクスについてもほぼ同様で、電気ノイズや計数スピードの点で顕著な問題が生じうる状況にはないと予想されている。

以上測定効率についてまとめると、モノクロメータの高性能化でRESAの中性子束を増加させられるならば、RESAの測定効率をかなり向上させられる。匠がフルパワー線源での運転の装置となる5年間程度は、RESAの存在は不可欠である。匠のTOF法を利用した利得が期待以上に大きく、またJ-PARC/MLFの出力上昇によって匠がRESAの10倍程度の高い測定効率を実現しても、匠、RESAを併用し、連携させる必要性があることを3.9.5で述べる。

(2) 微小領域の結晶構造、不純物の種類や量の同定

微小領域における結晶構造の測定のためには、ゲージ体積内の領域に対して粉末構造解析を行う必要がある。この測定のためには匠のほうが圧倒的に優位である。それは匠を用いると、試験体を固定した条件で広い波数領域にわたった測定が可能であるためである。試験体中を通過する中性子ビームパスは、匠の大型検出器バンクの検出器ピクセル毎に異なることが一般的に予想されるため、定量的解析に耐えるデータを高い測定効率で測定し、リートベルト解析等によって信頼性よく構造パラメータの最適化を行うことは困難である。回折パターンが同じと考えられる少数のピクセルのみ積算して利用すればある程度の解析は可能となるであろうが、工学回折実験では材料中のビームパスが長く、吸収の効果が大きい。そのため、通常の粉末解析実験のような信頼性の高い実験と定量的解析は一般的に困難である。半定量的な解析か、回折パターンと構造が既知の不純物の種類や量の同定等は比較的容易に行えるであろうが、定量的な解析をどうしても行おうとするならば、多くの経験と校正作業を必要とする地道な努力が必要とされるであろう。

RESAを用いても、残念ながらこの状況はほとんど改善しない。RESAでは単色中性子を用いるため角度分散による実験が必要である。角度スキャンを行えば、角度毎にゲージ体積が変化し、しかもビームパスは試験体の配置と散乱角度によって一般的には非常に複雑に変化すると予想される。そのため、一般的に言えばやはり定量的解析に耐えるデータの取得は容易ではなく、しかも定量的解析を行おうとすれば多大な努力を要し、粉末構造解析専用装置に比べ、信頼性もあまり期待できない。

(3) ミクロ組織構造の評価

材料の強度や破壊メカニズムを評価する上では、単に残留応力を測定するだけでなく、ミクロひずみや集合組織、転位密度等のミクロ組織因子を定量的に評価することが重要となる。これらの情報を得るうえで、X線回折法や中性子回折法は非破壊・非接触測定法として有効な手段であり、特に中性子回折法は、その優れた透過能から、試料全体のバルク平均が得られる特徴があり、機械的特性との関係を求めて材料開発や既存材料の信頼性を検討するのに適している。ひずみ測定においては、測定される回折線のピークシフト量を評価するが、それ以外にも、回折線の強度は結晶配向状態を、回折線幅は転位密度や転位セルサイズを示す等、ミクロ組織因子に関する種々の情報を得ることができる。

a) 集合組織の評価

集合組織を評価する場合、少なくとも3つの回折の集合組織を測定しないと、その材料の結晶方位関数(ODF)を決めることは難しい。RESAのような角度分散法においては、3つの回折の集合組織を個々に測定する必要があるが、また、測定条件にもよるが、例えば、5°おきに全極点図を測定するなら

ば、1回折あたり1297回の測定が必要になる。1回あたり10秒の測定であっても、1回折あたり4時間弱、3回折で12時間弱かかる計算となる。それに対して、匠のようにパルス中性子を利用したエネルギー分散法では、1回の測定で、あるエネルギー範囲に存在する複数の回折を同時に測定することができるので、回折ごとに集合組織を測定する必要はない。また、検出器により測定される立体角が大きいので、全極点図を測定するのに20回程度の測定で十分である。1回あたり10秒を必要とすれば、複数の回折の集合組織を3分以内で測定できる計算となる。RESAにおいても、2次元検出器を利用したり、複数の検出器を利用したりすることで、測定効率を向上できる可能性はあるが、それを考慮しても、測定の速さで比較すれば、確実に匠の方が有利である。この測定効率を活かせば、高温環境中の相変態過程における集合組織変化のIn-situ測定も実現できる可能性がある等、応用の幅は広がるが、室温大気中で実施する測定においては、必ずしも匠の性能を必要とすることはなく、RESAの利用で十分な課題も多い。したがって、ユーザーニーズに合わせて装置を使い分けることが重要である。

b) プロファイル解析

前述したように、回折プロファイルの持つ情報には、集合組織の他に転位密度や転位セルサイズといったマイクロ組織因子を含んでおり、フーリエ係数法や積分幅法を用いた場合には、一つの hkl のみの回折プロファイルを解析することで転位密度及び転位セルサイズを求めることができる。ここ数年、RESAを利用したプロファイル解析技術の開発研究が行われ、その結果、RESAにおいても材料に存在する転位密度や転位セルサイズ等を評価できるようになった。RESAで得られる回折プロファイルは、原理的に簡単な物理的プロファイル関数で表すことが可能であるが、匠で得られる回折パターンプロファイルは、物理的プロファイル関数とパルス中性子源特有の関数の畳み込みである。そのため、プロファイル関数を定量的かつ正確に評価すること、すなわち、プロファイル解析により転位密度や転位セルサイズを定量的に評価することは、複雑な関数を用いる必要があり簡単ではない。しかし、パルス中性子の回折プロファイルの関数化が多く行なわれており、匠も物理的とパルス中性子源特性を表す畳み込み関数をすでに用意しているが、実用できる関数の最適化が今後の課題である。その一方で、ウィリアムソン・ホール法は、複数の回折の半価幅と回折角(格子面間隔)の関係から転位密度や転位セルサイズを求める方法であり、この場合、多くの回折を一度に測定できる匠が有利と考えられる。しかし、フーリエ係数法や積分幅法を含めて、パルス中性子を利用したプロファイル解析技術に関する研究例は少ないため、いまだ確立された技術とはいえないが、今後発展する可能性のある課題である。したがって、匠によるプロファイル解析技術を早期に確立するためにも、RESAと匠とを相補的に利用した技術開発を進めることが重要である。

3.9.4 J-PARCの匠とJRR-3のRESA及びRESA-IIの利用料金について

産業利用にも供することを前提とした中性子工学回折装置については、その利用料金に関しては一つの重要な比較検討項目である。現在のところ、表3.9.4.1のような価格設定がなされている。ただし匠の利用料金は検討中であって現時点では未定であるが、非公開研究目的及び商業目的において1日当たり150万円以上の価格になるようである。この違いは、高価な装置価格の減価償却分と加速器運転に伴う多額の運転経費に起因するが、一方でJRR-3についても安価に設定されすぎているという認識があり、若干の価格の修正が検討されている。しかしながら一度決定した価格算定の根拠を大幅に覆して変更することは、会計検査上の問題点として指摘される要件になりうるので、にわかに10倍を超える価格の修正が加えられる状況にはない。すなわち、匠とRESAの価格差は今後も継続すると思われる。

両者ともに成果公開であればほとんど費用がかからないので、大学研究者の利用や、産業界も公開可能な測定技術の開発や標準的試料の測定等であれば大いに匠の利用を行うであろうが、成果非公開の利用については、価格に見合った成果、すなわち十分な費用対効果が期待できる場合に限られる。

すなわち製品開発上必要不可欠の情報が得られ、これら開発費や人件費等を十分回収できるだけの利益が期待できる場合のみであろう。一つ一つの製品の最終検査や出荷のために、匠を商業ベースで用いるような利用形態は、検査に必要な価格の面からも、また中性子の有無と検査の可否が製品完成に直結するため、よほど特殊な用途、製品でなければ想像できない。これは、価格の安い RESA についても同様である。すなわち、大学や研究所、試験所等公的な機関か、企業かを問わず、研究開発が利用目的の中心となると考えられる。

これまで、JRR-3 の RESA を利用した中性子産業利用が活発に行われている背景には、JRR-3 実験設備の利用料金の安さにある。X 線応力測定や分析等を外部機関に外注する場合と比較しても極めて安く、それが産業利用活性化につながっていると思われる。

RESA 及び RESA-II の価格の安さは、施設共用や共用促進に伴う一般課題の実施において、試験検査会社が課題責任者または実施者として、その経験とノウハウ、そしてしっかりした報告書の作成等と引き換えに、新たな付加価値をつけて参入する上で、彼らに十分な利益を生じるための価格上の余地を生むことが期待される。

表 3.9.4.1 J-PARC の匠と JRR-3 の RESA 及び RESA-II の 1 日当りの利用料金

	匠	RESA	RESA-II
成果公開	原則無償	手続き料+消耗品	手続き料+消耗品
非公開研究目的	150 万円以上	¥60,900	¥30,450
商業目的		¥71,200	¥35,650

3.9.5 JRR-3 における中性子工学回折装置の将来計画

前節までに述べた、中性子工学回折装置についての、J-PARC/MLF 及び JRR-3 の役割分担と連携に関する議論に従って、JRR-3 における RESA の将来計画は以下の通りとなる。

(1) 2011 年度以前

J-PARC/MLF のフルパワー出力が達成されていないために匠の装置性能が設計通りに発揮されない。加えて J-PARC/MLF の運転日数についてもかなり限定されることが予想されるため、国内唯一の実用的な中性子工学回折装置として、JRR-3 における RESA 及び RESA-II の存在意義は貴重である。RESA 及び RESA-II をフル稼働させて、増加する産業利用の需要を十分にさばいていくとともに、新規分野、利用者の開拓を行う。同時に、装置と測定技術の高度化を目的とした以下の項目についての技術開発を行う。

- i) 入射中性子のエネルギー帯域を増加できる大強度集光型モノクロメータの開発による入射中性子束の一桁増加。
- ii) 産業用ロボット、レーザーその他画像処理技術を駆使した超高速オフライン試験体セッティング技術の導入。
- iii) ii)と連携したユーザーフレンドリーな制御ソフトインターフェース開発と、匠と RESA の共通化。
- iv) 組織構造の配向性の効率測定にむけた大面積検出器の設置。

2011 年度までは、JRR-3 において残留応力に関する、①一般課題の消化、②新規開拓、③技術開発の三本柱による多角的な運営がせまられる。そのために多くのマンパワーを必要とすることは明らかである。その対策としては、

- a) J-PARC と JRR-3 両施設に関わる原子力機構内の関係者が、その所属や装置の帰属に係らず一丸となって連携して対処する。これらはすべて匠における研究及び産業利用の呼び水となるテーマであり、それぞれの装置の使い勝手や利用方法、ユーザーインターフェースがなるべく共通化することが望ましい。
- b) 現在大学関係者から、RESA 及び RESA-II を全国大学共同利用に供する要望書が、大学の原子炉利用の窓口である東大工学部原子力専攻に提出され、前向きに検討が行われている。この共同利用の枠組みを利用して人材、研究予算、技術、専門性をプロジェクトの推進に投入する。
- c) 一般課題、とりわけ産業利用に関しては(株)神戸工業試験場や住重試験検査(株)等の試験検査会社が仲介代行業に興味を示して参入を始めている。これら民間の計測のプロの持つパワーを結集する。
- d) 現在検討が進められている共用促進法の適用が行われるならば、共用課題、とりわけ産業利用が多い残留応力解析装置について技術支援員による共用課題の実施を行う。

c)に関連して、民間の試験検査会社もしくはその合同体が独自に運営できる実験ポートを必要とするほど需要が増加してきたならば、JRR-3 に RESA-III を新設することも検討に値する。

(2) 2012 年度以降

2012 年度以降は、匠の利用も本格化することが大いに期待されるので、匠と RESA 両者の役割分担と有機的な連携が満足に機能する必要がある。3.9.3 において記述したように、標準的なゲージ体積とひずみ測定精度によるルーチン的な測定と、0.01%を切る高いひずみ測定精度の測定は、匠の利用が有利である。成果公開型の課題であれば課題が採択されていれば無償で利用が可能であるが、3.9.4 で述べたように匠の高額の利用料金を考えるならば、企業にとって十分必要不可欠な情報が得られる確信と、事前に狙いを絞った実験計画を策定する必要がある。そのためには多くの場合に RESA の併用が必要とされる。例えば、

- ステップ 1： RESA 及び匠、両方の工学回折装置担当者との打ち合わせ。
- ステップ 2： RESA 及び RESA-II(稀に匠)による実験条件洗い出し等予備実験。
- ステップ 3： RESA または匠による本実験と解析。
- ステップ 4： RESA または匠による実験継続または再度予備実験。
- ステップ 5： RESA または匠による装置、条件変更後の本実験や確認実験と解析。

のようなプロセスをたどって実験が行われ、最終的な問題解決につながると思われる。一般的には、実験後の解析によって導かれた結果はそのまま使える場合と、結果の良否のチェックや不足データ取得のための再実験が必要になる場合がある。装置によらずデータ整理や解析ならびに解析結果の解釈等には期間は必要で、実験目的が同じであれば、測定時間を除けばそれに必要な期間はやはり装置によらずほぼ同じである。複数の回折ピークのデータが一度に測定できる匠は、それらの解析により追加情報が得られる反面、データが多いがために解析や結果の解釈には RESA よりも長い期間を必要とする。

また、試験検査会社等が、顧客に対して最も適切で合理的価格で測定を実施する場合については、RESA 及び RESA-II における本実験も欠かせないグレードの測定となるであろう。中性子が真に産業界に役立つツールとして定着し続けていくためには、利用料金には中性子関係者が特に注意を払っておかなければならない事項である。

J-PARC/MLF がフルパワー 1MW を達成した後の匠の装置性能と、J-PARC/MLF の年間運転日数、

さらに高度化を終えた RESA 及び RESA-II の装置性能がどのようなものか、現時点では細かい点に至るまでは明らかでないため、装置の限界に立脚した議論は困難であるが、今後 J-PARC/MLF がスタートし、その出力が増加していくとともに匠と RESA 両者の特性が明らかになることから、装置関係者と利用者が共に経験を積んでいながら最適の利用形態を検討すべきである。

2012 年以後も 2011 年までと同じで、①一般課題の消化、②新規開拓、③技術開発の三本柱による多角的な運営が必要となる。その際、上でも述べた標準的なゲージ体積とひずみ測定精度によるルーチン的な測定と 0.01%を切る高いひずみ測定精度の測定において匠の参入は重要であり、JRR-3 の RESA 及び RESA-II は技術開発と新規利用者の拡大を図る中心的存在としての役割を担う。

3.9.3 で述べたとおり、マイクロ領域の結晶構造解析については、匠で実施されるべき課題である。また、組織構造や配向性については、大型の検出器を設置できるならば JRR-3 でも十分実用的な強度と測定効率で測定可能であるが、匠は大型検出器バンクが設置されており、匠を使えば現実に速い測定ができる。マシンタイムの込み具合と実験の重要度を鑑み、また成果非公開課題の場合は経費負担者側の裁量によって匠における実施か RESA を用いるか判断されればよい。

J-PARC のパルス中性子を利用した装置が総合的に高い性能を有する。中性子工学回折装置の高い需要、特に産業界における様々な潜在的ニーズの多さを考えると匠 1 台で増大する需要をまかなえないことは明らかなので、JRR-3 との連携が重要であり、JRR-3 の強い中性子入射束を考えれば、その目的が十分達成可能な装置として RESA を高度化できることを述べた。しかしながら、もし今後 J-PARC に複数台の中性子工学回折装置を設置できるならば、装置としてはパルス利用の方が優れた測定手法であるためにより理想的な状況と言える。

現在の J-PARC 装置整備計画においては、匠以外に中性子工学回折装置を設置する具体的な計画は存在しない。もし 2 台目を設置するならば、匠とは異なる性能の装置、例えば匠より高い入射中性子強度の測定効率優先の装置の建設を行うとともに、今の匠を、モデレータの種類、分光器パラメータ、パルス周期等に関して再検討を行って分解能優先の装置に特化し、さらにその上で JRR-3 の RESA の役割には改めて検討を加える、といったしっかりとした将来像を持つ必要がある。

JAEA は独自研究推進のために装置を建設するのであって、外部利用に供することを主目的として装置建設を行うことは JAEA の本来業務ではない。そのため、JAEA が高額な装置建設費を伴うほぼ同種かつ同性能の中性子工学回折装置を 2 台設置する可能性は、現在の予算状況から考えてまずありえないであろう。装置性能が異なるならば、検討に値しないではないが、やはり茨城県や産業界等第三者がその目的に合わせた装置建設を行う方が筋として説得力がある。現在茨城大学の友田教授を中心に鉄鋼関連装置の必要性が検討されている。産業界が J-PARC の装置建設に乗り出すことは非常に好ましい状況であるが、3.9.4 でも述べたように、高額な建設費と利用料金については十分な情報を開示して情報交換に努める必要がある。