産業利用のための 中性子ビーム利用への第一歩

一般財団法人 放射線利用振興協会

中性子利用技術部

中性子散乱等に関係の深い定数および公式

【物理定数など】

中性子の質量	m _n	$= 1.6749 \times 10^{-27}$	kg
陽子の質量	$m_{\rm p}$	$= 1.6726 \times 10^{-27}$	kg
軽水素原子の質量	$m_{\rm H}$	$= 1.6736 \times 10^{-27}$	kg
電子の質量	me	$= 9.1094 \times 10^{-31}$	kg
光速度	С	$= 2.9979 \times 10^{8}$	ms ⁻¹
素電荷	е	$= 1.6022 \times 10^{-19}$	С
プランク定数	h	$= 6.6262 \times 10^{-34}$	Js
ボルツマン定数	k	$= 1.3806 \times 10^{-23}$	Jk ⁻¹
1 eV		$= 1.1605 \times 10^4$	k

【中性子のエネルギー, 波長, 速度】

$E (\mathrm{meV}) \rightarrow \lambda(\mathrm{nm})$	$T(\mathbf{K}) \rightarrow E(\mathbf{meV})$	$E (\mathrm{meV}) \rightarrow V (\mathrm{km/s})$
$\lambda = \sqrt{\frac{0.81805}{E}}$	E = 0.08617T	$V = \sqrt{\frac{E}{5.2270}}$

【結晶の面間隔(d)】

立方晶系	$\frac{1}{d} = \sqrt{\frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2}}$	正方晶系	$\frac{1}{d} = \sqrt{\frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2}}$
六方晶系	$\frac{1}{d} = \sqrt{\frac{4(h^2 + k^2 + hk)}{3a^2} + \frac{l^2}{c^2}}$	斜方晶系	$\frac{1}{d} = \sqrt{\frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2}}$
単斜晶系	$\frac{1}{d} = \sqrt{\frac{h^2}{a^2 \sin^2 \beta}}$	$+\frac{k^2}{b^2}+\frac{l^2}{c^2\sin^2\beta}$	$\frac{2hl\cos^2\beta}{ac\sin^2\beta}$

目次	
----	--

1. はじめに	1
2. 中性子の基礎と特徴	1
3. 中性子の役割	5
4. 中性子源	7
4.1 核分裂型中性子源	7
4.2 核破砕型中性子源	7
4.3 中性子源の違いによる測定手法	8
5. 中性子ビーム利用の事例	9
5.1 物質材料の構造	9
5.2 工業材料の健全性評価	14
5.3 ソフトマターの構造	17
5.4 タンパク質の構造	19
5.5 薄膜への応用	20
5.6 元素分析	21
6. 中性子ビームを利用するための手続き	22
7. 終わりに	24

1. はじめに

我が国の中性子ビーム利用は 1965 年 日本原子力研究所(原研)の JRR-2 の 出力 10MWでの共用利用運転に始まる. 当時は大学及び原研の物理部門の研究 者の利用が主であったと聞いている.

その後,本格的な中性子ビーム利用 を目指して JRR-3 の改造が行なわれ, 1990 年 11 月から利用運転を開始した 結果,物理化学,生物学,工学の学術 分野で中性子ビーム利用者が急激に増 加した.2005 年から日本原子力研究開 発機構 (JAEA) で施設共用制度の開始, 続いて(一財)放射線利用振興協会

(RADA)が企画・運営する文部科学 省「中性子利用技術移転推進プログラ ム」が実施された結果、中性子ビーム の産業利用者数が増加してきているも のの、未だ十分とは云いがたい.また、

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex)の MLF (<u>Materials and</u> Life Science Experimental <u>Facility</u>)が本 格的に稼動しており,更に, J-PARC 中 性子線利用者支援を実施する登録機関 が設置され,中性子利用の環境が整っ てきている.

そこで先端的中性子ビーム利用とり わけ産業利用の促進を願い,中性子の 基礎と特徴,中性子源,中性子ビーム 利用事例,利用方法等について概説す る.中性子及びその利用の説明に際し, 厳密さよりも直感的な概念を重視し, 中性子ビームの特徴などを馴染みの深 い X 線のそれと対比しながら進める. なお,本小冊子には"メモ&余談"欄 を設けてあるので各自のメモ書きに利 用されたい.また,余談を記してある が,興味がなければ,読み飛ばして頂 いて結構である.

2. 中性子の基礎と特徴

知られているように,核内に存在す る中性子は強い力を受けて安定に存在 しているが,一旦核外に出た中性子は 不安定であり、約15分の平均寿命(= 半減期は約10分)を以ってβ崩壊する. それ故、中性子は内部構造を持ってい ることが推測できるだろう.中性子は β崩壊によって電子,陽子,ニュトリ ノに分かれる.このことから、中性子 が電荷を持たないこと, 電子の質量が 陽子のそれに比較して小さいので中性 子の質量は陽子のそれ(1.7×10⁻²⁷ kg) とほぼ同じであることが分かる.また, 電荷を持った電子と陽子が中性子内部 で運動している様を思い浮かべると, そこには磁気の発生、即ち、中性子が 小さな磁石であることが想像できるで あろう.更に、中性子は粒子と波動の 二重性を有している.

de Broglie は粒子と物質波を

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

で関連づけた.ここで、 λ , m, v, h はそれぞれ波長, 質量, 速度, プラン ク定数を表す.速度 2 km/s で飛行す る中性子の波長を概算すると,

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6.6 \times 10^{-34} \,\mathrm{J} \cdot \mathrm{s}}{1.7 \times 10^{-27} \,\mathrm{kg} \times 2 \,\mathrm{km/s}}$$
$$= 1.9 \times 10^{-10} \,\mathrm{m} = 0.19 \,\mathrm{nm}$$

- 1 -

$$([J] = [kg m^2 s^{-2}])$$

となる.この値は Cu KaX 線 (波長 0.15 nm)と同程度である.また,このときの 中性子の運動エネルギーE は,

 $E = \frac{1}{2}mv^{2} = 0.5 \times 1.7 \times 10^{-27} \text{ kg} \times (2 \text{ km/s})^{2}$ $= 3.4 \times 10^{-21} \text{ J} \approx 21 \text{ meV} \approx 244 \text{ K}$

となる.この値は X 線のエネルギー(+ 数 k eV) に比較し,非常に小さい.こ れを温度に換算すると約244 K であり, 室温の物質の熱エネルギーと同程度で ある.上記の概算から,中性子は X 線 と同様に波動性に基づいて結晶による 回折現象の観察が可能となり,また, 粒子性に基づいて結晶格子振動

(Phonon)などの励起過程の観察が可能となることが分かる.

X 線は物質を構成する原子の電子と 相互作用するのに対して、中性子は主 に原子核と相互作用して散乱,回折, 吸収現象を引き起こす. X 線及び中性 子について元素による散乱・吸収能力 を円の面積を使って図1に示した.こ の図から, X 線による散乱能力は原子 の電子数が多いほど大きくなっている ことが分かる. 例えば、水素のそれは 非常に小さく, 原子番号の増加に従っ て散乱能力が大きくなっている. 周期 律表で隣接する元素を含む物質に於い て、回折実験などから、これら両者の 元素を区別することはなかなか容易で はない.一方,中性子の散乱能力は核 の種類によるので,周期律表の順序に 関係なく核それぞれによる. 例えば, 重水素(²₁H)の散乱長(散乱振幅)が

【メモ&余談】

1) 岩塩構造を持った KCl イオン結晶の粉 末試料の中性子回折実験をおこなった結 果,下図(a)の回折パターンを得た.なお, 岩塩構造において回折線 hkl は,指数 h, k, l,の全てが偶数,または,全てが奇数の場 合にのみ観測可能である(偶数・奇数の混 合指数 100,110 などは観測出来ない.220, 111 は観測可能).



同じ試料を同じ波長を持つX線を用いて 回折測定を行った. どのような回折パター ンが得られるだろうか? 回折線の位置 (強度は任意で良い)を上図(b)に書き 入れてみてください.

【ヒント】①K および Cl の原子番号は, そ れぞれ 19, 17 である. ②立方体結晶の 8 個の角に原子がある場合,指数 h,k,l に依ら ず全ての hkl 回折線が観測可能



2)原子,原子核の大きさ
 ・原子の大きさ:1億分の1 cm
 ・原子核 :1兆分の1 cm
 (万,億,兆など4桁毎に読み方が変わる.
 日本の単位系もまんざら捨てたものではないかも.ただし単位は cm.)



図 1. 元素毎の X 線散乱能力及び中 性子の散乱能力と吸収能力。

×線及び中性子の散乱能力をそれぞ れ円の面積で示す. ×線の散乱能力は 原子番号の大きい元素ほど高い. 中性 子の場合は、その傾向はなく、また、 同位体も区別できる. 中性子の透過を 妨げるものとして吸収と散乱過程があ るので、吸収断面積と散乱断面積を合 算した値を"実質的な吸収"として表 示している.

正の値をとるのに対して軽水素(¹H) のそれは負の値であり,全く異なって いる.

大雑把に言って,原子の大きさ及び 格子定数はそれぞれ 10^{-10} m (0.1nm) 程度である.原子核のそれは 10^{-14} m 程 度である.それ故,物質を構成する結 晶空間は電子雲でほぼ満たされたもの である.この空間を伝播する電磁波で ある X 線 (Photon) は電子雲で吸収又 は散乱され,奥深く進めないことが容 易に理解できるだろう.一方,中性子 は 10^{-14} m の大きさの核が各々 10^{-10} m

離れて配置している非常に疎な空間を 飛行する.このことから、中性子の物 質透過能力はX線や電子線に比較して 一般に高いことが理解できる. それで も、飛行する幾らかの中性子は核から 力を受けて原子核に捕獲される. 原子 核の捕獲面積が大きければ、中性子が 捕獲される確率は高くなる. 散乱につ いても同様である.これらの面積をそ れぞれ吸収断面積, 散乱断面積と言い, その面積を barn (バーン)の単位で表 す. 1 barn は 1×10⁻²⁸ m² (核の直径の 2 乗と覚えればいい(1×10⁻¹⁴ m)²) であ る.これらの面積は、核種によってそ れぞれ異なる値を持つし,また,中性 子の速度に反比例する.元素毎の吸収 断面積, 散乱断面積, 散乱長など中性 子ビーム利用に有益なデータは NIST のホームページに載っている. NIST の HP で示されているデータは、2.2 km/s の速度(運動エネルギー25.3 meV)を 持つ熱中性子の場合である.

X線回折測定では凡そ 0.1nm の波長 を用いる.電子雲の大きさもこれと同 程度であるであるので,X線の散乱能 力は回折角の増大につれて減少する. 通常のX線回折実験において測定範囲 は,精々,回折角(20)で 100 度程度 までである.これ以上の角度で測定し ても回折線の強度が小さくて解析に役 に立たないからである.これは原子散 乱因子に依るものである.一方,中性 子回折実験において,散乱能力は回折 角度に依らない.これは,中性子の波 長に比べ原子核の大きさが 10⁻⁴ と極め て小さいからである.

なお,図1に示したX線による散乱

能力の大きさは、散乱角が零度の場合 のものである.

中性子はスピンを持っている,即ち, 一番小さな磁石であるので,中性子は, 電子が原子核の周りを回ることなどに よって生ずる電場スピンや核自身が持 つスピンと相互作用して散乱される. 磁性物質から散乱される中性子を計測 することで,その磁気的性質が分かる. この特徴を利用して X 線が不得意とす る物質の磁性研究に中性子ビーム利用 が非常に役立つ.

中性子を吸収した原子核が不安定状態になり,直にγ線を放出する.これを即発γ線と呼んでいる.即発γ線を 計測することで,物質・材料を構成している多元素及び微量含有元素を含めて一度に非破壊で分析できる.

概ねエネルギー2meV 以下の中性子 を冷中性子(多くの原子炉には冷中性 子源が設置されており,この中性子源 から概ね 10 meV 以下の運動エネルギ ーを持つて放出される中性子も冷中性 子と呼ばれている),500 meV 以下の中 性子を熱中性子と呼んでいる.材料開 発や物性研究には専ら熱中性子と冷中 性子が利用される.

X線に比較して中性子の特徴を列挙 すると,①軽元素の検知能力が高い, ②透過能力が高い,③同位体を区別, ④究極の磁石,⑤波の性質を持ち,回 折,散乱を起こして結晶構造解析が可 能,⑤試料全体を非破壊で多元素分析 が可能,⑥粒子の性質を持ち,非弾性 散乱を起こして格子振動など原子運動 の観測が容易,などである.

【メモ&余談】

中性子の散乱長や吸収断面積が載っている NISTのHP* にアクセスすると期律表が表示 される.そこで,知りたい元素をクリックす れば,目的のものが得られる.例えばHを 選択すると以下の表が現れる.



Scatt xs と Abs xs の合計した値は,入射中性子が 吸収や散乱されることにより透過しない程度を表 している.それ故,ラジオグラフィ等で試料内部 が見えるか否かの判断データとなり得る.

*NIST の URL:

http://www.ncnr.nist.gov/resources/n-lengths/

面(-100)



図 2. Bragg 回折を起こす条件

立方晶系単結晶を Z 軸方向から見 た格子点を示す.ここで, a, b, c はそれぞれ格子定数を表す.面 (-100)と面(000)で反射する 2 つの波の行路差は線分 AOB であり, この行路差が波長の整数倍のとき に反射光が無限遠方で強めあう.即 ち, $2d\sin\theta = n\lambda$ が成り立つ場 合に回折線が観測される.この関係 式を Bragg の回折条件という.ここ で n は自然数, d は面間隔を表す.

3. 中性子の役割

中性子の役割を大別すると、①物を 観測、②物の分析、③物を改質、の 3 つが挙げられる.これらについて概観 する.

(1) 物を観測

物を観測する方法の一つは, A4 判程

度の面積の広い中性子ビームを製品材 料に入射させて、その透過画像から製 品材料の内部を透かし観る方法である. これは一般のX線レントゲン撮影の中 性子版(中性子ラジオグラフィ)であ り、実空間で観測する方法である.中 性子ビームを利用する利点の一つは、 軽水素(¹H)が中性子を透過させない (吸収断面積と散乱断面積の和が大き く、実質的吸収が大)ことから、水や オイルなどが鮮明に観測できる点であ る.この特徴を利用して、X線では観 測が困難な植物中水分の分布やその濃 度、エンジン内部の潤滑油の挙動観察 などに中性子ビームが用いられる.

物を観るもう1つの方法として,中性 子ビームを物質に入射させて,物質か らの回折又は散乱された中性子を計測 する方法がある,この方法により,物 質の結晶構造,磁気構造,励起過程, メゾスコーピック領域の大きな構造, 励起過程などの観察ができる.

回折測定から結晶構造を探る方法を 述べるが、その前に、回折について記 す.図2は回折を起こす条件を示した ものである.この図では、立方晶系単 結晶の格子を例として示している.平 面波が入射し、面(-100)と面(000) で反射する2つの波の行路差は線分 AOBとなる.この行路差が波長の整数倍 のときに反射光は無限遠方で強めあう. 即ち、 $2(d\sin\theta) = n\lambda$ が成り立つ場合 に回折線が観測される.この関係を Braggの回折条件という.ここでnは自 然数、dは面間隔を表す.

結晶構造を明らかにするには,先ず回 折線測定,即ち,波長λを持つ中性子光 を試料に当てて試料からの Bragg 反射 (回折線)の観測を行う.次に,観測 した回折線の回折角度 20の値から回折 面それぞれの面間隔 d を得る.この d と回折線の強度とを基にして結晶構造 を決めることとなる.回折線測定デー タの解析にはRietveld法が用いられる.

(2) 物の分析

中性子を利用した元素分析の手法に は、即発γ線分析は多元素及び微量含 有元素を含んだ試料全体を非破壊で一 度に分析でき、且つ、比較的短時間に 結果が得られる特徴を持っている. X 線を用いた元素分析手法として蛍光X 線分析があるが、試料全体を非破壊で 観測することは得意ではなく、軽元素 の検出は出来ない.

放射化分析は,原子核を中性子により 核変換を起こさせて,即ち,試料を積 極的に放射化させて,これから放出す る y線を計測することで元素を同定す る方法である.この方法では原子炉炉 心に試料を設定しなければならず,中 性子ビーム利用と離れるので詳細を省 く.

(3)物の改質

物質材料に中性子を照射し,一部の元 素を核変換させて,新たな特性を有す る物質材料へ改質することができる. この例として Si 半導体の製造や医療用 アイソトープ^{99m}Tc の製造があるが,中 性子ビーム利用と離れるので詳細を省 く. 【メモ&余談】

散乱など,波を取扱うに場合,実空間をフ ーリエ変換して出来上がる逆格子空間が重 宝な道具となる.例えとして,世界の国を見 るものに地球儀があるが,ぐるぐる回さなけ れば裏は見えない.不便である.そこで,球 表面を円柱表面へ投影変換し,この面を展開 した世界地図を我々が普通に利用している. これは全体がみわたせるので便利である.逆 格子空間もこれに似ている.

道具は使ってみなければ,その有り難さが 分からない.一寸だけ逆格子を使ってみよう.実空間で Bragg 回折を起こす条件を図2 に示した.これに対応する逆格子空間を描く と以下のようになる.

逆格子空間での座標軸を $2\pi/a$ など実空間の逆数で表す.この変換で,実空間の面は 逆格子空間では点に変換されるので逆格子 空間で,何々面と言うと直ぐ分かる.これは 便利である.入射光,反射光の波長λもその 逆数 $2\pi/\lambda$ へと変換する.変換後の波のベ クトルをそれぞれ入射光波数ベクトル,反射 光波数ベクトルと言い \mathbf{k}_{i} , \mathbf{k}_{f} と書く.Qは散 乱ベクトルで, |Q|は $4\pi sin(\theta)/\lambda$ である. Bragg 反射はQ=Gのときおきる.Gは逆格子 空間の位置座標と考えればいい.



この図で示した k_i及び k_fの方向が図 2 に 描かれている入射光及び反射光の方向とそ れぞれ同じであることを確かめて下さい. 上図に,λが短い場合も参考のために載せ

た. 入射光ベクトルと反射光ベクトルの成す 角度(20)が小さくなっている.

4. 中性子源

中性子源は大きく分けて,原子炉でウ ランを核分裂させて中性子を得る核分 裂型の中性子源と粒子加速器で重元素 を破砕して中性子を得る核破砕型中性 子源の二種類がある.

4.1 核分裂型中性子源

1 個の熱中性子が U に取り込まれる と不安定になり核分裂を起こす.その 際に 2~3 個 (平均 2.3 個)の高いエネ ルギーを持った中性子を放出する.こ れら高いエネルギーを持つ中性子を重 水中で減速させて熱中性子化する.そ の一部は次の核分裂に用いられ,残り の熱中性子を原子炉外に取り出して利 用する.原子炉は連鎖反応によって定 常的に稼動しているので,発生する中 性子の中性子東強度及びエネルギー分 布は時間に依らず一定である.それ故, 原子炉による核分裂型中性子源のこと を定常中性子源と呼んでいる.

この中性子源を利用するには, 色々 な波長を持って飛来する中性子群の中 から, 必要とする波長を持った中性子 を選択する必要がある. この波長選択 機構を単色化と呼び, 一般に単結晶の Bragg 反射を利用している. 選択した波 長 λ の中性子を入射光とするので, 回 折 実 験 に お い て は, Bragg の 式 $2d\sin\theta = n\lambda$ の θ を可変させて測定す ることになる. これは X 線測定法と全 く同じである. この利用方法が直感的 であること, また, X 線装置が身近に 存在することから, 波長を固定した測 定法は中性子利用初心者にとって理解 され易く,教育的である.また,入射 中性子東強度が弱いため,X線回折実 験に比べて中性子回折実験では多量の 試料が必要である.

4.2 核破砕型中性子源

この中性子源は J-PARC の MLF で利 用されている. 先ず, 陽子を直線型加 速器及び3 GV シンクロトロンで加速 し、高エネルギーになった陽子を MLF の水銀ターゲットに衝突させて水銀原 子核を破砕する.この時、ミュオン、 中間子などの素粒子とともに中性子が 弾き出されるので、この中性子を利用 する. MLF では、25Hz で時間巾の短い パルス状の陽子ビームを用いているの で, 種々のエネルギー(又はλ)をも つ中性子がパルス状(パルス巾:数~ 数十μ秒)に発生する. それ故, パル ス中性子源と呼んでいる.発生した中 性子を有効に利用するために, モデレ ータによって熱中性子化され, それぞ れ試料へと導かれる. エネルギーの高 い(んが短い)中性子は中性子源から 試料の間を短時間で飛行し,中性子の エネルギーが小さく (λが長い) なる につれて、その飛行時間は長くなる. 中性子の波長 λ は、中性子が発生源か ら検出器までの飛行時間, TOF (Time Of Flight),を計測し、この計測値から中 性子の速度を求め, de Broglie の関係を 用いて導出される. それ故, この種の 回折実験においては $2d\sin\theta = n\lambda$ の λ を可変することになる.

定常中性子源の場合は発生した中性 子の中から必要な波長を持つ中性子を



図3. 回折パターンの比較

波長が異なった2つの回折パターン (上図). 下図は上図の横軸をそれぞれ $4\pi\sin\theta/\lambda$ で取り直して描いた回折パ ターンを重ねて描いたもの. 回折線が重 なっていることが分るであろう.

抜き取って利用するのに対し,パルス 中性子源では発生した中性子の殆どを 利用するので,中性子の利用観点から 実質的に強い強度ビームとなるため試 料測定に要する時間は短い.

4.3 中性子源の違いによる測定手法 定常またはパルス中性子源を利用す る場合,測定方法はそれぞれ異なる. しかし,物を観るという立場からは, 原理的に同じである.測定の手法の違いを,回折測定を例にとって以下に述 べる.

定常中性子源を利用する場合はX線 と同じ計測方法をとる.即ち,検出器 を,例えば5度~150度まで,スキャン させて測定する.得られた測定デー



X線及び単色甲性子回折の場合, **Q**を (**K**₁, **K**f の成す角20を) 次々に変えて回折強度を 測定(これをスキャンという)すると, **Q**が 逆格子点と出会うときに回折線が観測でき る.



回折線強度は等価な回折面の数(多重度)に 比例する.例えば,立方晶の場合の{002} 回折は(002),(020),(200),(00-2), (0-20),(-200)の6つの等価な面による ものである.従って,この場合,多重度は6 になる.中括弧付きの{002}は,(002)と 等価な面を代表した表記. タは、通常、横軸に回折角 20を、縦軸 に中性子回折強度を取って整理される. 図3の上部に波長 λ が異なった入射中性 子の回折パターンを示した.この両者 の回折パターンを統一的に表示するに は如何にしたら良いだろうか? 横軸 を統一した物理量で整理すれば良いこ とが想像できるだろう.横軸をそれぞ れ $4\pi\sin\theta/\lambda$ (= $2\pi/d$, これを Q と して、これ以降表示する)で書き直し た回折パターンを図3の下方に示す. それぞれの回折線の位置が重なってい ることが分かるであろう.

パルス中性子源の場合,検出器が入 射ビームに対してある角度方向に固定 されており,この検出器で試料から回 折される中性子を刻々と測定する. そ れ故、測定データは横軸に TOF を、縦 軸に中性子回折強度を取って整理され る. これも横軸を Q で再整理すること で、図3の下図と同様なパターンが得 られる.結局、利用装置が異なっても 横軸を Q とすれば統一的な整理ができ る. 定常中性子源での測定では, 回折 角,20,が零度~180度の範囲に限られ る.これに対し、パルス中性子源では、 長波長から短波長の中性子を利用する ことから、0の広い領域における回折 線が測定できる特徴を持っている.

5. 中性子ビーム利用の事例

中性子が種々の特徴を有し、研究・技術開発等に役立つことを述べてきた. ここでは、X線の利用では非常に困難 だが、中性子では得意とする実験事例 を示す.

5.1 物質材料の構造

物質材料の重要な物性の一つは結晶 構造である.高性能な材料開発のため には、この基本的物性を知ることが非 常に重要である.材料を構成する原子 の静的配列(結晶構造)を調べる実験 は、入射中性子と散乱・回折された中 性子のエネルギーが同じである現象 (中性子弾性散乱)を使う.

5.1.1 結晶構造·磁気構造

中性子が軽元素識別能力に長けてい る特徴を活かして、Liイオン電池材料 LiCoO₂の結晶構造を明らかにした例を 紹介する.この例は、Liイオンが占め る結晶学的位置の決定を目論み、JRR-3 炉室に設置された高分解能中性子粉末



図 4. Li 電池正極材料 Li CoO₂の中性子回 折パターンと Rietveld 解析結果 (上図)及びその結晶構造(下図) (JAEA, 井川直樹博士提供)

構造回折装置(HRPD)を利用して測定 されたものである.測定は粉末試料を バナジウム箔(厚さ0.02mm)製の直 径10mm,高さ40mmの試料容器に充 填して実施された.

Li イオン電池材料の回折パターン及 び Reitveld 解析結果及びこの解析から 得られた結晶構造を図4に示す.

この実験から,Li イオンの結晶学的占 有位置が明らかになっている.また, Li イオン電池の劣化要因を明らかにす るため充放電を多数回繰り返した試料 について,充放電前後での結晶構造の 変化,Li イオンの占有位置及びその占 有率を調べ,劣化機構を明らかにした 利用例もある.



ターンと Rietveld 解析結果

中性子の磁気検知能力を活かして磁 気構造を明らかにした例は数多く在る. HRPDによる BaFe₁₂O₁₈の磁気構造解析 の例を紹介する.測定した回折パター ン及び Rietveld 解析結果を図5に示す. また,解析から得られた磁気構造を図 6に示す.これからFeの磁気モーメン ト及び方向を理解することができる. 【メモ&余談】<続き> 2)パルス中性子源の場合 ある中性子検出器に注目すると、中性子 の入射及び回折方向が固定されており、速 度の速い(k_iが大きい)中性子が最初に、 速度が一寸遅くなった中性子が次々に試料 へ飛来する.その中で,Bragg回折条件を 満たす k_iの中性子が入射したときに回折線 が観測される.原理的には1つのパルスと 検出器の方向 (Ght fair) (Ght fair)

1 つの検出器で回折パターンが計測できる が,強度が弱いのでこの計測を繰り返して 行い,データを時間積算すると共に,ある 立体角領域の中性子検出器群で得られたデ ータを積算して利用する

結晶構造解析について

試料の準備が確りと成されておれば、回折 実験は非常に容易い.解析は面倒であるが、 得られた回折パターンを解析する際に有用 である解析のソフトとして Rietan-FP, Z-Rietveld, Full Prof, GSUS などがある.

これらのソフトは格子定数など結晶構造 パラメーターの精密化をおこなう支援ソフ トである.回折パターンをこのソフトを通 せば結晶構造が決まるという魔法の道具で はない.重要なのは初期結晶モデルを確り と描かれていることである.初期の結晶モ デルを構築するには,試料調製における構 成元素組成,熱処理中における他の相の出 現可能性,論文やデータベースなどの情報 が助けになる.初期モデルで回折パターン を説明できなければ,改良結晶モデルを作 り再出発となる.MEM プログラムも結晶構 造解析に有用である.



図 6. BaFe₁₂0₁₈の磁気構造

酸化物固体燃料電池材料開発への中 性子ビーム利用の例を紹介する.この 種の材料では酸素イオンの高導電性が 望まれている、そのためには、酸素イ オンの拡散経路や熱振動による酸素イ オンの格子点における存在確率の広が りの知見が必要である.この広がりを 調べるには、振動振幅を際立たせるた めに出来るだけ間隔の狭い複数面から の回折強度を計測する必要がある.言 い換えれば,回折線の分解能が十分で 且つ狭い面間隔からの回折線、即ち、 原子炉の回折装置では回折角 20 が大 きい、あるいは TOF(核破砕型中性子 源用の回折装置)が短い範囲まで測定 が可能な装置を利用する必要がある. 酸化物固体燃料電池材料(La,Sr)(Ga, Mg)O₃₋₆の研究に於いては、上述の条件 を充たす MLF (J-PARC) BL20 に設置 されている茨城県材料構造解析装置(



図 7. (La, Sr) (Ga, Mg) 0_{3-δ}の回折パター ンと Rietveld 解析結果(上図)及びその結晶構造(下図). 下図では,酸素の格子点における存在確率の広がりが方向によって著しく異なり,また,他の原子のそれに比べ非常に大きくなっている

(AGC セイミケミカル KK, 伊藤孝憲博士提供)

iMATERIA) 用いて実験が行われた. 図7に(La, Sr)(Ga, Mg)O_{3-δ}の回折パタ ーン及び Rietveld 解析結果及び存在確 率の広がりを表した結晶構造を示す. この図から,酸素イオンの存在確率の 広がりの大きいことが見て取れる.

5.1.2 メゾスコーピック領域の構造 中性子小角散乱はナノメーターから サブマイクロメーター領域の構造を観 測する方法である.主な対象物として ソフトマター及び析出物等がある.こ の散乱では,対象物のスケールが大き いことから,波長の長い冷中性子が用 いられる.析出物等の観測は普通の電 子顕微鏡観察は試料の極微小領域の表面 に限られ,材料全体を観ている訳では ない.それ故,中性子小角散乱実験か ら,厚さ約2mm,広さ10mm×10mm 程度の試料全体についての析出物等の 構造やその平均濃度などが測定できる ことは大きな利点である.

軽水素の散乱長が負の,重水素のそ れが正の値を持つことを利用し,高分 子の一つの成分と同じ散乱長を持つよ うに軽水と重水を適当な比率で調合し た溶媒と特定の高分子成分を一体化し, 他の成分を鮮明に浮き上がらせること が出来る,即ち,中性子利用ではコン トラストを付けて観測が出来る特徴を 有する.

小角中性子散乱を利用した研究例は 枚挙に遑がないが,TiO₂ナノシートの メゾスコーピック領域における構造研 究事例を紹介する.一般的に,光触媒 は近紫外線領域において活性能力を有 し,大気浄化・防汚,水質浄化など環 境保全に役立つ材料であるが,可視光 でも活性能力を発揮する高性能化が求 められている.その実現のために,焼 成温度の異なるTiO₂ナノシートの散乱 強度をJRR-3の小角散乱装置 (SANS-J-II)と超小角散乱装置(PNO)を 利用して測定された.

測定結果を図8に示す.参考のため

【メモ&余談】



図 8. 酸化チタンナノシートの小角 散乱実験結果 図中の直線の傾き-2 および-4 は散乱体がそ れぞれ層状,球状であることを示している.

に、球状多孔体試料の測定データも示 した.この図から、ナノシート光触媒 の散乱強度が、低波数領域(10⁻⁴~10⁻² nm⁻¹)で波数の増加とともに傾き-2 で 減少し,波数~10⁻² nm⁻¹の処で-4 の勾 配で減少し始めていることが見て取れ る.このことから、ナノシートは厚さ 数百 nm(~10⁻² nm⁻¹の逆数×2 π)の層 状構造を持っていることが分る.また、約 0.4 nm⁻¹の波数位置には散乱強度ピ ークが認められることから、層を構成 している球状微粒子の粒径は数 nm(~ 0.4 nm⁻¹の逆数×2 π)であることが分 かった.

更に,窒素をドープすることで可視 光でも高い活性を有する TiO₂ナノシー トを得た.窒素がどの位置占めている かを明らかにするため,ドープナノシ ートの中性子小角散乱実験を行なった. その結果,ドープナノシートの散乱強 度はドープ前のそれに比べて約 3.5 倍 高く,強度の波数依存性は同じであった.種々のモデルについて散乱強度を シミュレートした結果,窒素原子が微 粒子表面に局在している可能性を見出 している.このように,小角散乱は大 きな構造を観測するのに適している.

5.1.3 励起

前述したように,熱中性子のエネルー が物質の励起エネルギーと同程度であ



図 9. Li₂0のフォノン分散関係 (石井提供)



- 13 -

ることから,格子振動や磁気励起など の励起過程を調べるには中性子ビーム 利用が最適である.入射中性子のエネ ルギーと散乱した中性子のエネルギー との差が励起過程で費やされたエネル ギーであることから,この実験は中性 子非弾性散乱のカテゴリーである.ま た,この手法は中性子光を励起光とし たラマン測定と概念的に同じである. 中性子産業利用では中性子非弾性散乱 実験の利用が殆どないことから,"こ んな事も出来るのか"の程度で認識し て頂ければ幸いである.

ここでは酸化リチウム(Li₂O)の格 子振動の例を挙げる.安定同位体⁷Li を用いて製作した⁷Li₂O単結晶を試料 として JRR-3 に設置されている三軸型 中性子分光器(TAS-1)を利用して測定 されたものである. 測定した格子振動 エネルギーを規格化した Q 座標に対し て示したものが図9である.これらの データから各原子間に働く力の定数 (バネ定数)を得ることができ、原子 間の結合の強さを明らかにすることが できる.また、求めた力の定数を用い て、Li₂Oの熱物性を論ずる際の基礎と なる振動数の状態密度(図10)が得ら れるなど、原子の動的性質を明らかに することができる. MLF に設置されて いる四季装置を利用すると,一度に広 い Q 座標に渡って上記と同様な測定を 短時間で行なうことが可能である.

5.2 工業材料の健全性評価

中性子の高透過性と回折現象を活か して工業製品材料の深部におけるひず 【メモ&余談】

み分布測定,工業製品の内部の可視化 技術,を利用して工業製品の健全性の 評価ができる.これらの健全性評価技 術は国民生活の安全性を高めることに 寄与するので非常に重要である.

5.2.1 残留応力

残留応力は,工業製品部材を多結晶集 合体とみなし,部材の局所における結 晶の面間隔d,無ひずみ状態の面間隔 d₀,ヤング率及びポアソン比の弾性定 数を測定することにより求められる. 測定箇所を次々と変えて,同様な測定 及び解析を行なうことで,材料中の応 力分布が得られる.得られた応力を材 料自身の降伏応力値などと比較するこ とにより,また,有限要素法(FEM) による部材全体の応力解析に役立てる ことにより,部材の機械的な健全性評 価が行われる.

JRR-3 では RESA 装置が利用され, MLF では匠装置が用いられている.図 11 に RESA 装置の測定概要を図示した.



図 11. RESA による測定の概要図



図 12. 厚肉溶接継手の残留応力 溶接金属下端部(b)では回折角が 低角度側へ大きくシフトし,格子面間 隔が広がっている.

図 11 から分かるように,幅及び高さを 数 mm 程度に絞った入射中性子ビーム を試料へと導き,材料深部の微小部分 によって回折された中性子をコリメー ター付の一次元検出器で計測し,材料 深部におけるひずみを高精度で評価し ている.面間隔 d は回折線ピークの回 折角度の精密測定から決定される.

残留応力解析装置を利用した実験は 非常に多い.一例として,溶接部の内 部における残留応力測定を紹介する.

溶接部の割れの防止は、構造上の安

全確保の観点から重要である. ここで 紹介する研究の事例は、水素に起因す る低温割れの研究の一環として、溶接 部の応力状態を調べたものである.用 いた材料は 980MPa 級の厚肉溶接継手 である. 応力を測定した位置と溶接先 端部における回折線の測定結果を図 12 に示す.赤色で示した回折線の回折角 度は無ひずみのそれ(青色)よりも小 さくなっている. このことは格子面間 隔が広がっていること、即ち、引張ひ ずみが存在していることを表している. このひずみ量と弾性定数を用いて応力 を求めた結果, 1000MPa 超の大きな引 張残留応力が発生していることが分っ た.この事例から、非破壊で部材の深 部における内部応力を得るには中性子 ビームを利用することが有効であるこ とが分る.

5.2.2 製品材料内部の可視化・映像化 中性子の高透過性と軽水素(H)の 実質的な中性子吸収能力が大きいこと を利用して,中性子ラジオグラフィ装 置を用いて撮影された透過画像の事例 を示す.

図13の例は、電子写真方式のコピー 機の現像剤粉体(トナーとキャリアー の混合粉体)の混ざり合う様子を中性 子で透かし見たものである.トナーは 高分子樹脂と顔料からなる微粉末で非 常に軽いが、一方、キャリアーは鉄粉 末であり重い.印刷する場合には、こ のトナーとキャリアーが充分に混合さ れている必要がある.また、電子写真 方式のコピー機には小型化、高速化、 高機能化、高画質化などが要求されて 【メモ&余談】

残留応力実験において,実験前の段取り が大事である.一旦,段取りが決まれば, ひずみ測定や解析は坦々と行えば良い(評 価は別であるが).段取りとして,大事な 事項は以下のとおりである.

応力を求めるにはお互いに直交する三 方向のひずみ量を計測しなければならない.これを考慮して,試料のセッテングを 如何するか,複雑な形状の試料では入射及 び反射ビームがそれぞれ測定ヶ所及び検 出器へと邪魔されることなく到達するか の机上チェック.

本文中では、"無ひずみ状態の面間隔 d_0 " とサラリと記したが、実際はどうなんだろうか? 場合にも依るが、例えば、工業製品に外部から力を作用させた場合(相対的なひずみの増減)には、作用前における面間隔が d_0 となり得る.一方、絶対的なひずみを考える場合は、同等部分を事前に切り出したり、残留ひずみ測定後に試料を裁断して、応力が開放された小さな断片各々についての面間隔を計測し、これを d_0 としている.



回転開始直後(0~1秒)では軽いトナーが巻き上げられて、 トナーとキャリアーが分離.丸で囲った部分はトナーの相.



1秒~20秒後,振動しながら界面で混合が徐々に進んでいく



20秒~40秒後,混合が進み振動が収まっていく.

図 13. 現像剤粉体の混合の様子の時間 変化

いることから,現像剤粉体のハンドリ ングが重要になってきている.図13に はアルミ製ドラム中に置いたトナーと キャリアーの混合の様子をドラムの回 転開始直後からの時間経過として画像 で示したものである.

この画像から,軽いトナーと重いキャ リアーとの混合の様子が手に取る様に 分かる.同様な実験をX線で行なった と想定すれば、キャリアーの影は分か るもののトナーのそれは見え難い.ト ナーが高分子であるので水素原子(H) を含んでいるので、中性子ビームによ る透かし見ることでトナー及びキャリ アーの双方の動きがはっきりと観察で きる.

5.3 ソフトマターの構造

高分子製品が市中に溢れている.さ らに高性能な高分子材を開発するため には、機械的な特性を評価するだけで なく、ナノスケールにおけるミクロ構 造の特性を良く評価して、機械特性、 光特性、電気特性などの物性との関連 を理解した上で、成分の調整や製造プ ロセスの開発を行うことが重要である.

バルクな高分子材料のナノスケール 構造を理解するためには中性子小角散 乱法が適している.なぜなら,高分子 材料を構成するのはナノメートル領域 の塊であり,それらが混ざって濃度の 揺らぎを空間的に構成しているからで ある.また,高分子を構成する原子の 多くは水素であり,中性子は軽元素で もよく感応するからである.通常数 nm から 1μ m までのスケールを持つ構造 は小角散乱装置を使い、 1μ m から 10 μ m までのスケールを持つ構造は2結 晶型超小角散乱装置を使って測定する.

一般的に言って,小角散乱強度の減 衰の仕方は散乱体となる高分子塊の大 きさ(平均の大きさ,回転半径),形 状(球状,球殻状,楕円体状,円柱状 など),表面(界面)の構造(平滑度, 密度変化)の情報を秘めている.これ らが現れる波数領域は散乱体の大きさ や形に依存して一義的には決められな いので,いろいろと解析を試みる必要 がある.

中性子小角散乱実験例を示そう.図 14は、燃料電池膜作成プロセスにおい て、四弗化エチレン樹脂(PTFE)に放 射線架橋、グラフト重合、スルホン化 を順次加えた場合の構造変化モデルと 中性子小角散乱実験結果を示したもの である.



図 14. 燃料電池膜の作成スキーム(a と対応する中性子小角散乱データ(b) (茨城大学小泉教授,原子力機構前川康成博 士提供)

【メモ&余談】

TNRF装置では,高速撮影(500 枚画 像/秒)が出来る.また,CTスキャンも 可能であることから,工業製品・材料中の 欠陥箇所やその形状も同定できる. PTFE 膜に対する散乱強度((1)黒 丸)は, 波数 Q が 10^4 Å⁻¹台と $10^4 \sim 10^2$ Å⁻¹領域でほぼ Q⁴に従って減少してい るが, この波数帯では表面の構造が現 れる領域であり,表面(界面)が平滑 であることを示していると考えられて いる. 波数 Q が 10^3 Å⁻¹付近に現れてい る"肩"は内在する微結晶の構造を示 していると考えられている.

次に、PTFE 膜に放射線架橋を施す ことによって、波数 Q の 1.5×10⁻²Å⁻¹ 付近に小角散乱パターン(緑丸)中に ピークが現れたが、この波数は、放射 線架橋によってもたらされたと考える 新しい塊構造(微結晶)が実空間で450 Å程度の大きさを持つと理解できる. この構造はその後のプロセスにおいて もある程度維持されるようである.

一方,薄膜材料や表面・界面を研究 する場合は,反射率測定を行う必要が あることは後で述べる.

5.4 タンパク質の構造

医薬品開発研究の現場において,創 薬標的タンパク質の立体構造に基づく 薬物の設計が行われている.タンパク 質の構造を明らかにするためには大き な単結晶が必要である.ここでは, HIV-1(ヒト免疫不全ウイルス)を取り 上げ,その結晶構造を決定した例を紹 介する.

HIV-1 プロテアーゼ(タンパク質) と HIV タンパク質の機能を阻害する KNI-272(化合物)の複合体単結晶を作 製した.作製された大型単結晶(4.3× 2.5×0.8 mm³)を重水置換して中性子回 折実験を JRR-3 に設置されている BIX 装置を用いて行った. なお, タンパク 質の構造は複雑であるので, 中性子実 験に先立ち, タンパク質の骨格部分を X線回折によりに決定し, タンパク質 の機能を発現する水素・水和水を含む HIV-1 タンパク質の結晶構造を決定し た. これは酸素中性子ビームが得意と する軽元素検知能力を発揮した事例で ある.

HIV-1 単結晶の中性子回折パターン を図 15 に示す.



図 15. HIV-1 単結晶の中性子回折

パターン

図中には約 5000 回折点が観測されて いる.



図 16. HIV-1 単結晶の構造

図中のオレンジ色の円で示したのが 阻害剤(化合物)である.水素,炭素, 窒素,酸素,硫黄の原子はそれぞれ白, 緑,青,赤,黄色で示している. (株式会社創晶 安達博士, JAEA 黒木博士提供) これらの観測データの精密解析から, 全体の約半数を占める 2062 個の水素原 子,190 個の D₂O 分子のそれぞれの結 晶学的占有位置を明らかにした.得ら れた HIV タンパク質の結晶構造及び阻 害剤の位置を図 16 に示す.

これらタンパク質の結晶構造解析が 創薬と密接に関係するので,軽元素検 知能力に長けた中性子ビームの利用が 増加してくると思われる.

5.5 薄膜への応用

中性子反射率測定は多層膜試料の各 層の密度分布(厚さ)を調べるに適し た手段である. 高密度情報記録媒体は 磁性多層膜で構成されており、また外 部磁場を印加することで磁気層の構造 に係る知見が得られるので, 産業利用 分野での利用が多い.反射率測定の特 徴として、①膜の厚み方向についてサ ブnmオーダーの高い空間分解能を有す るので,表面・界面構造の観察に有力, ②広い面内での平均構造が得られる。 ③非破壊測定ができる,④液体表面及 び液/液界面の密度ゆらぎが計測でき ることが挙げられる.これらを測定す る装置として、JRR-3に設置されている SUIREN, MLF に設置されている写楽 (垂 直型, 偏極中性子の利用が可) 及び SOFIA(水平型であるので、液体の界面 観察に適する)がある.

ここでは、ダイアモンド・ライク・カ ーボン (DLC) 膜の膜密度の利用例を紹 介する.DLC 膜を切削工具などに施すこ とで、耐摩耗性特性の向上が図れるな ど産業界にとって有益な薄膜材料 【メモ&余談】



図 17. DLC 薄膜の中性子反射率測定

である. 測定試料は Si 基板上にフイル タードアーク蒸着法 (FAD 法) により DLC を成膜したものである.実験は,先 ず,中性子ビーム入射角固定して反射 中性子強度を計測し,続いて入射角を 次々と変えながら、それぞれに応じた 反射強度の測定を行った.測定結果を 図 17 に示す. この図から. FAD 法で成膜 した DLC 膜(青線)の臨界角が従来の DLC 膜(赤線)のそれより大きく右側に 在ることから,膜密度が大きくなって いることが分った.この臨界角は薄膜 の全反射(薄膜の中性子散乱長密度(薄 膜を構成している元素の散乱長×密 度)に関係する)ことに注目して解析 したところ, FAD 成膜法による DLC 膜お よび従来の成膜法の DLC 膜の密度がそ れぞれ 3.2 および 2.0 (g/cm³) であるこ とが分った.

5.6 元素分析

中性子が原子核に取り込まれると核は



図 18. 農産物の産地同定(佐賀県 産,北海道産の玉ねぎ)

K(カリウム)濃度に対するB(ホ ウ素),S(イオウ),Cl(塩素)の 濃度比に着目してデータを多変量解 析した結果,産地判別が可能である ことが判った.

不安定になり,γ線を放出する.また, 核変換を起こして放射化した核が生成 された場合も同様である.即発γ線分 析は中性子を照射すると直ちに放出す るγ線を測定して試料に含まれる元素 を分析する手段であり,放射化分析に 比較して簡便である.

農作物の産地同定の研究に利用され た例を以下に示す.この実験で用い た試料は, 佐賀県産及び北海道産の玉 ねぎであり, それぞれ玉ねぎの可食部 分を砕き均一化した後, 乾燥させたも のである. これらの試料に中性子を照 射し, 放出 y 線スペクトルを計測した. 測定時間は約 30 分と短時間である. 測 定スペクトルを図 18 の上部に示す. こ の測定結果を基に, 検出元素比, B/K, S/K, Cl/K を三次元プロットしたものが 下図である. 佐賀産と北海道産は少し 異なった領域に分布していることから, 産地判別が出来そうである. 同様な研 究は墓石についても実施されており, その結果, 中国産と茨城県産とは明瞭 に区別できることが分かっている.

6.中性子ビームを利用するための手 続き

中性子の基礎的事項及び利用事例に ついて概観してきたので,読者は中性 子ビーム利用に興味をもたれたことと 確信する.また,利用したいと思って も,どのようにアクセスするのか? 相 談は?などなど中性子ビーム利用への 不安があることと思われる.そこで, 利用に役立つと思われる情報を以下に 記す.

中性子ビーム利用施設は,JRR-3, MLF(J-PARC)の2施設であり,共に茨 城県東海村の日本原子力研究開発機構

(JAEA)の原子力科学研究所に在して いる.JRR-3 中性子利用の全般に係る利 用支援は「JRR-3 ユーザーズオフィス」 が,一方,J-PARC のそれは「J-PARC ユーザーズオフィス」がそれぞれ担当 している.JRR-3の利用システムを図

【メモ&余談】

即発 y 線元素分析で素早く産地同定が出 来る(出来そうである)のは面白い.

ある機関が開発した新たな花があったと しよう.この種を他のところで育てて市場に 出回った場合、当然、開発した機関が権利を 主張することになる.このとき、花の遺伝子 を調べても産地が分らない.この分析法を用 いれば、育った土壌の分かることになり、産 地が同定できる.延べては、権利の確保につ ながると期待できる.



19 に示す.

JRR-3 施設共用制度における利用区 分として,成果公開と成果非公開の2 種がある.中性子ビーム利用実験期間 は上期及び下期の2期に分けられてい る.これに相応して、利用課題の定期 公募が成果公開および成果非公開に関 わらず年2回実施される.上期に実験 を実施する課題の公募期間は、前年度 の11月1日から同月30日までである. 一方,下期課題の公募期間は同年の5 月1日~30日である. 何れも, Web に よる申請方式のみで実施され、FAX や メールでの申請は受け付けていない. 課題申請後、専門家の評価、その評価 点を基に委員会で課題採択が行なわれ る. その後、申請代表者へ課題の採否 結果、利用日数などが通知される、続 いて,装置担当者から実験実施日についての連絡が来るので,協議をして実験実施日を決める.

実験は JRR-3 原子炉の放射線管理区 域で実施することから, 放射線被曝線 量計の着用が義務付けされている. そ のため, 電離放射線従事者用の健康診 断が必要となる.実験実施日が決定す ると, 事務担当者から健康診断等提出 の案内が来るので、その指示に従う. 実験終了後、データ解析を行ない、そ の結果をまとめた報告書を提出すれば 全てが終了となる.申請書及び報告書 は基本的に日本語で記載することとな っている.勿論,成果非公開型での申 請は課題名と利用者名を記入するのみ で、実験内容等を記入する必要はない、 また,報告書を提出する必要もない. 更に, 定期公募以外に, 利用希望装置 のマシンタイムに余裕があれば、課題 の随時募集も受け付けている.

MLF の中性子ビーム利用システム は公募時期が異なるものの,JRR-3のシ ステムとほぼ同じである.異なるのは, 申請書や成果報告書は英文で記載しな ければならないことである.なお,産 業利用の場合は日本語でも可である. もう一つの違いは,課題公募が5月下 旬と10月下旬に開始されることであ る.

JRR-3 および MLF 利用に関し, 利用 者のための相談窓口として, それぞれ JRR-3 ユーザーズオフィスおよび J-PARC ユーザーズオフィスが開設さ れている.

中性子利用を希望する多くの企業は, 公募が年2回では実験の間隔が離れ過 ぎであり,製品・材料開発に支障を来 たすとの見解を持っておられる.これ に相応して,茨城県では,MFL に設置 した茨城県材料構造解析装置 (iMATERIA)を利用するために,い ち早く随時公募制度を立ち上げ,これ を運用されている.また,中性子産業 利用初心者のためのトライアルユース 制度を既に運用されている.更に,メ ールインサービス(測定代行,実験者 が J-PARC 施設へ来る必要なし)も開 始されている.

J-PARC 中性子利用の支援を行う特 定中性子源利用登録機関(CROSS)お よび JRR-3 ユーザーズオフィスでは, それぞれ中性子トライアルユースを実施している.

7.終わりに

中性子の特徴の概説および中性子ビ ーム利用事例を急ぎ概観してきた.断 りがない限り,ここで示した事例は, 当協会が企画・運営した文部科学省「中 性子利用技術移転推進プログラム」の 下で実施されものである.

このプログラムで実施したその他の 中性子利用事例は次のホームページ http://www.rada.or.jp/neutron/index.html に載せてある.

付録 A 中性子関連のホームページ

- 1. 元素毎の中性子散乱長等の基礎データ
 1) NIST http://www.ncnr.nist.gov/resources/n-lengths/
- 2. 中性子利用
 - 1) 中性子ビーム実験代行サービス
 - http://www.rada.or.jp/neutron/service.html
 - 2) 中性子産業利用事例 <u>http://www.rada.or.jp/neutron/example.html</u>
 - 3) JRR-3 ユーザーズオフィス

http://jrr3uo.jaea.go.jp/

4) J-PARC ユーザーズオフィス

http://is.j-parc.jp/uo/

- 5) 総合科学研究機構(東海事業センター) http://www.cross-tokai.jp/ja/
- 6) (独)日本原子力機構 量子ビーム応用研究部門 <u>http://qubs.jaea.go.jp/index.html</u>
- 7) いばらき量子ビーム研究センター http://www.pref.ibaraki.jp/kikaku/kagaku/kenkyu_kaihatsu/ryoshi_beam.html
- 8) 茨城県中性子ビームラインの産業利用 <u>http://www.pref.ibaraki.jp/kikaku/kagaku/ibaraki_bl/index.html</u>
- 3. 中性子施設
 - 1) JRR-3 研究炉 <u>http://jrr3.jaea.go.jp/1/11.htm</u>
 - 2)物質・生命科学実験施設@J-PARC <u>http://j-parc.jp/MatLife/ja/</u>
- 4. 大型放射光
 - 1) SPring-8 大型放射光施設 <u>http://www.spring8.or.jp/ja/</u>
 - 2) 公益財団法人高輝度光科学研究センター (JASRI)

http://www.jasri.jp/ja/

 一般財団法人 放射線利用振興協会 東海事業所
 中性子利用技術部
 TEL: 029-229-0848, FAX: 029-229-0437
 http://www.rada.or.jp/neutron/index.html

この冊子は、渡辺記念会科学助成の下で実施した調査研究の一環として作成されたものです。