

## 巻頭言 金属研究における中性子

鈴木 謙 爾\*

### 1. 加速器パルス中性子の幕開け

中性子は、1932年 Cambridge 大学 Cavendish 研究所の James Chadwick により発見され、陽子と共に原子核を構成する粒子であるが、電荷が限りなく零に近い中性粒子であることが確認された。この功績により1935年 Chadwick にノーベル物理学賞が授けられた。1936年には、Halban と Preiswerk により多結晶鉄からの核散乱†が観測され、中性子が de Broglie の物質波原理に基づく波動としても挙動することが示された。そして奇しくも同年、Bloch は中性子のもう一つの特性である磁気散乱††を予言した。第2次世界大戦を挟むその後の10年間、中性子は核エネルギーの開発に関連して精力的に研究かつ利用された。実際、Chadwick もこの期間 Los Alamos 研究所にあって、核兵器の開発に関わっていた。

第2次世界大戦が終結し、1940年代後半から50年代初頭にかけて、アメリカを中心としてヨーロッパ諸国やソヴィエト連邦では、中性子を probe とする物質科学の広範な研究が一斉にスタートし、次々に中性子源としての原子炉が建設された。しかし、1960年代後半から1970年代初頭にかけて研究用定常出力原子炉の熱中性子束†††(～10<sup>15</sup> n/cm<sup>2</sup>/s)は飽和してしまい、さらなる高中性子束を求めて加速器パルス中性子源の研究開発が始められた。原子炉定常中性子源に比べて、加速器パルス中性子源では比較的低コストで冷中性子†††から熱外中性子†††にいたる広いエネルギー領域の高中性子束を入手できるのみならず、S/N 比の向上や TOF 法の活用等の利点があることが明らかとなった。

実は、日本は世界に先駆けて加速器パルス中性子源を開発し、実用化したパイオニアである。電子ライナックを用いる(γ, n)パルス中性子源が、1960年代中頃に東北大学と北海道大学において、Harwell 研究所とほぼ同時期に建設された。

しかし、電子ライナックの(γ, n)パルス中性子源では、高エネルギーγ線による発熱や高いバックグラウンド等の技術的困難のため高中性子束を得るには限界があり、高エネルギー・プロトンによる核破砕反応すなわちスパレーション中性子源への移行が程なく志向されるに至った。

1970年代に入ると、筑波の高エネルギー物理学研究所(KEK)500 MeV プースター・プロトン・シンクロトロンにスパレーション・パルス中性子源 KENS-I の建設が始まり、1980年6月に稼働を開始した。その直前に、Argonne 研究所におけるプロトタイプのスパレーション中性子源 ZING-P と東北大学の300 MeV 電子ライナックによる(γ, n)パルス中性子源の短い前史が存在するが、この1980年は正に本格的な加速器パルス中性子時代が幕開けした記念すべき年である。その後、1980年代には米国の LANSCE, 1990年に入ると英国の ISIS が稼働を始め、パルス中性子源の性能は従来の定常出力原子炉中性子源と同等あるいはそれを凌駕するレベルになり、ついに21世紀はパルス中性子の時代に突入した。本特集の中でその性能が詳しく紹介されている J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex)は正に新時代の最先端を行くスパレーション・パルス中性子源である。

### 2. パルス中性子による金属研究

日本では広島・長崎の原爆投下の悲惨な体験に基づき、原子炉中性子を手段とする学術研究は欧米に比べて10年以上遅れてスタートした。このような止むを得ない事情が反映して、原子炉中性子ではもっぱら物理学研究特に磁性研究により寡占された。しかし、加速器パルス中性子の場合、大学に設置された比較的小規模の電子ライナックを用いて自らの手で建設することから始まったので、既得権の枠外にあった新分野からも自由に参加することができた。

\* 東北大学名誉教授；財団法人特殊無機材料研究所理事長(〒982-0252 仙台市太白区茂庭台 2-6-8)

Neutrons as a Probe of Metal Research; Kenji Suzuki (Professor Emeritus, Tohoku University, Sendai. Advanced Institute of Materials Science, Sendai)

Keywords: neutron, pulse, spallation, accelerator, metal, scattering, J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex)

† 核散乱：中性子と原子核との相互作用により生じる散乱・回折。X線や電子線による散乱と同様に結晶構造など原子配列についての情報が得られる。本稿2章「パルス中性子による金属研究」および358頁「大強度小角散乱装置大観」参照

†† 磁気散乱：対電子の磁気モーメントとの相互作用により生じる散乱・回折。結晶の磁気構造や磁区構造等の情報が得られる。本稿2章および358頁「大強度小角散乱装置大観」参照

††† 冷中性子、熱中性子、熱外中性子：中性子の波長は中性子の速度(エネルギー)により決定され、波長の長い(速度の遅い)方から順番に冷中性子、熱中性子、熱外中性子となる。本特集記事347頁「J-PARC とは？」参照

2009年3月13日受理

電子銃から取り出した熱電子を加速してタングステン・ターゲットに打ち込む、得られた高速中性子を水あるいはポリエチレンにより減速する、ベリリウム反射体を積み上げて熱中性子を捕集する、加速器のトリガー・パルスを基準にして中性子の飛行時間を計測してエネルギー分析する(TOF 検出法)等々の一連の基本的プロセスを直に見たり、触れたり、考えたりすることができた。このために、原子炉中性子では Second-class citizens であった材料研究者や化学者が、加速器パルス中性子では磁性研究者と肩を並べて実験ができるようになった。このことが、後に KENS や J-PARC の建設を支える貴重な人材を育て上げる大きな原動力になった。

さて、やや一般的になるが、ここで材料研究、とりわけ金属研究において、中性子がどのようにユニークな probe として機能するかを概観してみよう。

(1) 中性子、X線、電子が散乱されるターゲットは、原子核、電子、電荷である。加えて、中性子には核スピンや電子スピンをターゲットとする磁気散乱がある。これらの異質な散乱機構の組み合わせに着目して、原子の位置や運動、電子分布、化学結合等の情報を引き出すことができる。

(2) 中性子は物質をよく透過するので、試料深部の情報を得ることができる。核散乱振幅は同位体により異なるので、一般に原子番号が小さい軽元素(H, He, Li, Be, B, C, N, …)の検出が X線や電子線に比べて容易である。

(3) 中性子の核散乱振幅は同位体や核スピンにより異なるので、化学的に単一成分系であっても、中性子から見れば多成分系である場合が多々ある。したがって、散乱が常に干渉性(コヒーレント)であるとは限らず、非干渉性散乱が付加される場合がある。例えば、液体の場合、干渉性散乱からは原子の集団的運動が観測され、非干渉性散乱からは個別運動のみが観測されるので、自己拡散を分離・識別できる。

(4) 加速器パルス中性子では、広い運動量～エネルギー領域((Q, E)空間という)をスキャンできるので、特性長が 0.1～100 nm, 特性エネルギーが 0.1～100 meV にまたがる広い階層的構造や運動を原理的に特定できる。

(5) 加速器パルス中性子の検出やエネルギー測定には、飛行時間(Time-of-Flight (TOF))法を用いることができるので、測定の精度や効率を向上させるのが容易であるのみならず、遅延調節により時間分割測定が可能になる。また、検出のタイミング以外の時間は検出回路のゲートが閉じられるので、ノイズの侵入を抑え、S/Nを向上できる。

### 3. J-PARC が拓くフロンティア

J-PARC は、既存の中性子源に比べて1000倍以上の画期的強度を有するが、さらに電子ライナックから KENS までの40年間に蓄積された経験と知識を受け継いでいる。これは、他の中性子施設には見られない特筆すべき歴史の重みであり、潜在的な力になっている。

さて、金属は、セラミックや有機材料に比べて、人類が古くから活用してきた材料である。そのために、金属学には貴重な知識や経験が沢山蓄積されている。大方の金属材料は、

溶解—凝固過程を経て製造され、さらに製造過程においてさまざまな尺度長の組織が合目的に制御されて、はじめて使い物になる。それにもかかわらず、これまで溶解あるいは凝固しつつある金属塊の深い内部が直接観察されたことはない。手段がなかったからである。しかし、現在の中性子透過実験は金属試料深部のイメージングを 10 μm の空間分解能で可視化することができる。液体金属中の微小な介在物や気泡の動きを直接目視することもできる。もちろん、歪、空孔、析出物、揺らぎ等々の欠陥の深部観察はお手のものである。

金属学において残された重要な分野として、微量な軽元素の挙動がある。X線や電子では、軽元素の散乱断面積がマトリックス金属に比べて著しく小さく、その検出が難しい。さらに、表面近傍の浅い部位からの散乱や回折である。他方、中性子では、軽元素の散乱振幅がマトリックス金属のそれに比べて大きい場合が多く、軽元素の観察が得意である。特に、軽水素 H は異常に大きい非干渉性核散乱振幅を有するので、金属中の水素の自己拡散や振動を原子尺度で追跡できる。水素吸蔵合金、燃料電池等々の動力学的基礎研究のみならず、詳細な内部可視化による工業的応用研究も期待できる。軽水素 H を構成成分とする水、オイル、食品、生体等々への応用展開は、前途洋々たる未来分野である。

多元系の金属ガラスや過冷液体合金に見られるように、短範囲—中範囲—長範囲の各階層構造間の相関が絡み合った複雑物質が示す物性が面白い。例えば、酸化物高温超伝導体の局所構造の同定には、パルス中性子が得意とする High-Q 測定による動径分布の高分解能観察が役立てられている。

これから続々と出現が期待される新機能複雑構造材料に立ち向かうためには、多様な異質の手法を駆使することが鍵になる。中性子と X線の併用、コンピューター・シミュレーションとデータの可視化、小角散乱と High-Q の同時測定、静的構造とダイナミクスの結合等々が考えられる。とりわけ、J-PARC のパルス中性子と SPring-8 の放射光を巧みに組み合わせることは、極めて重要になる。

さて、本特集では、斯界の最先端の研究者により、夢が実現しつつある21世紀の中性子材料研究がもっぱら語られている。しかし、異分野の研究者が集まる J-PARC は、学生諸君や若手研究者がグローバル化した研究者社会を骨太に生き抜く力を鍛錬する格好の道場でもある。

1982年ケンブリッジにおいて Chadwick の中性子発見50年記念講演会が開催され、プロシーディングス「The Neutron and its Applications, 1982」が英国物理学会から刊行された。四半世紀余が経過した現在においても、中性子科学の歴史を思い起こすには極めて優れた成書である。他方、加速器パルス中性子の発展の経過は、KENS の稼働停止を記念して2007年に出版された報告書「KEK 陽子加速器の軌跡—中性子・ミュオン—」の中で、自ら歴史を創造してきた関係者自身により生き活きと証言されている。巻頭言の舌足らずを補うべく、この2書がお役に立つことを切望する所以である。