

## ◆平成 29 年度 第 1 回（通算第 62 回）蔵前ゼミ 印象記◆

日時：2017 年 4 月 28 日（金）

場所：すずかけ台 J221 講義室

### ハカセノススメ

高橋 雅人（1998 機宇宙，2000 創エ MS，2003 Dr）

理化学研究所 ライフサイエンス技術基盤研究センター 構造・合成生物学部門 NMR 施設 上級研究員

技術系の最高峰の一つである市村賞をもらった時のいきさつが印象的だった。多人数からなるチームで仕事をした場合は、栄誉は代表であるボスに集中するのが普通だが、上司から「理研は高橋さんの名前で応募してみなさい。きみが頑張ったのだから」と言って貰えたのだ。高橋さんたちが何を成し遂げたかを正確に理解するには物理化学の専門知識が必要だが、大まかに言えば、原子核から微弱な情報を引き出すための世界最高の技術を開発したのだ。

「原子核から情報を取り出す」と書くと、難しそう、ここから先は読んでもらえそうにないが、磁石を使えばよいと分かれば抵抗感は減るだろう。しかも、その情報は（1）分子の構造を決定し薬の開発に役立てたり、（2）MRI（Magnetic Resonance Imaging）画像としてがんや脳梗塞の診断に用いられたりと私たちには馴染みの情報となれば、原理を知りたくなる。私も読者の皆さんの期待に応えるべく、連休返上で高橋さんの話を反芻しながら専門書と格闘した。

この世に存在するものの大部分（全て？）は回転している。原子核も例外ではない。原子核は陽子と中性子からできているので電荷的にはプラスだ。必ずしも正しい表現ではないが荷電したものが回転すると磁場が生じるとすると、原子核は小さな磁石とみなせる。このような（磁気モーメントを持った）核を強い磁場内におくと、コマのように歳差運動を始める。ここで周波数を変えながら電波を照射すると、歳差運動の周期と同じ周波数のところで吸収が起こり（核磁気共鳴，Nuclear Magnetic Resonance, NMR），原子核の状態を読み取ることがで

きる。微小磁石としての原子核の挙動は周囲の状況（電子状態や他の原子核）に左右されるので、原子核を介して間接的にその周辺の物質情報を入手できる。

外から加える磁場が安定で強ければ強いほど、多くの情報が得られるので、いかに強い磁場を作るかを巡って激しい国際競争が繰り広げられた。高橋さんたちは、この競争を勝ち抜き、当時限界と考えられていた  $1 \text{ GHz}$  ( $1 \times 10^9 \text{ Hz} \approx 23.5 \text{ T} \approx 23.5 \times 10^4 \text{ G}$ ) の壁を突破し、 $1.02 \text{ GHz}$  を達成した。これは高橋さんの言う“ハカセ”の力があつたればこそだ。学者っぽい「博士」とどう違うのか？アカデミアに限らず、どこでも活躍できる「ハカセノススメ」に耳を傾けてみよう。博士も博識があるだけでは淘汰される。庶民っぽいが芯のある「ハカセ」を目指そう。

### 高橋さんの略歴（表 1）

茨城県南部で育った高橋さんは、4 類に入学し機械宇宙学科に進んだ。3 年次までは、成田線、京浜東北線、大井町線などを乗り継いで片道 2 時間かけて大岡山に通った。憧れだった一人暮らしを実現するために、4 年次からの卒業研究では、すずかけ台の岡村哲至（機物 1982, 博 87）研究室を選び、「つきみ野」に下宿した。専門分野は、超伝導磁石などの冷却技術だ。超伝導磁石といえば磁気浮上方式で走るリニアモーターカーで有名ゆえ、それを支える低温工学も人気分野の一つと思っていたが、意外と専門家が少なくニッチな領域だそう。ライバルは少ないが少数精鋭同士の闘いで、やりがいがあるようだ。

表 1. 高橋雅人 略歴

1998	東工大工学部機械宇宙学科卒業	東工大
2000	大学院総合理工学研究科 創造エネルギー専攻 修士課程修了	
2003	博士号取得(総理工 創造エネルギー専攻 岡村哲至研究室)	
	博士論文:「熱機械効果を利用した超流動ヘリウム流路の冷却特性」 専門は超伝導磁石冷却技術	
2003	理化学研究所横浜研究所に勤務	理研
	NMRプローブ開発(極低温プローブ, NMR信号用高周波回路など)	
	参加学会が低温工学からNMR討論会や個体NMR・材料フォーラムへと変わった	
2006	JST先端計測・機器開発「超 1 GHz NMRシステムの開発」に従事	
	⇒1020 MHz (1.02 GHz) NMRの開発に成功 (2015年)	
	主に、磁場安定化, NMRプローブ開発の一部, その他もろもろを担当	
	公募申請時から最後までいた数少ないメンバーの一人(理研側の現場担当者)	
	⇒市村産業省・貢献賞を受賞(2016年4月25日)	
2014	JST先端計測・要素技術「全原子を測定対象とする次世代型NMR装置の開発」に従事	
	高知大学の山田和彦特任講師(プロジェクトリーダー)と一緒に企画・立案 分担研究者として高温超伝導NMRプローブを開発中	

修士の時に、就職活動をちょっとしてみたものの、相手企業の色に染まることに抵抗を感じて何となく博士課程に進学することにしたそうだ。「目的意識が低いダメ学生だった」と高橋さんは振り返った。博士課程では喝を入れられるような事が起こった。D2の時に実験装置が壊れるというピンチに見舞われたのだ。実験ができないということは卒業できないということを意味した。普通はショックで取り乱すか落ち込むはずだが、高橋さんは、このとき自分でも不思議なほど、冷静でいる自分に気づいた。博士号がかかっていた実験装置の致命的な故障に、さほど動揺することもなく現実を受け入れ、次の手を考えられたのだ。そして、たまたま耳にしていた新しいシミュレーション法を研究することにした。思っても見ない形で自分のメンタルの強さを発見できたことに加え、博士論文発表会では審査員に褒められ、“博士”とはどういうものか、研究で大切なものは何かをつかむことができたことは、大きな収穫だった。

#### <博士課程で学んだこと、学んで欲しいこと>

博士課程を終えて分かったこととして、高橋さんは次のようなことをあげた：(1) 一番大事なことは精神的にタフであること。実験装置が壊れたぐらいでめげてはいけないうし、ボスにぼろくそに言われても全く気にしないこと。精神的に辛くなってやめていく学生が出てくる状況で、高橋さんは自分の“鈍感さ”が幸いしたと思えるそうだ；(2)

博士課程は基本的には一人前の研究者になるためのトレーニング期間だが、だからといって他人のモノマネに終始してはいけない。小さな事でもいいので、新しいものやアイデアを生み出す必要があること。この経験こそが博士としてやっていけそうだという自信につながるからだ；(3) ある特定の狭い分野でいいので、そこに関しては世界一詳しい人にならなければ世界と競争していけないこと。自分の専門分野で尖っていないと、いくら広範かつ深い学識があり高邁な議論ができて、その魅力は半減する；そして最終的には、(4) 自立して研究できるように、研究の仕方をしっかりと身に付けることが大切であること。そうすれば、机と椅子(ポジション)さえ与えてもらえれば、多少分野が異なっても結果を出して見せるという気概が生まれる。高橋さんがイメージするハカセ像を言葉にするのは難しいが、芯(強い内面と尖がった専門)があつて頼りになる博士が“ハカセ”なのかもしれない。

刀で言えば、竹光は論外として、床の間に飾る名刀(博士)か合戦用の軍刀(ハカセ)なども思案した。以下で紹介する先端プロジェクトや国家プロジェクト(国プロ)などの大型プロジェクトでは、多くのポストドクが推進役として雇用される。ここで埋もれないためには、(1) 一仕事してやろうという気持ちと(2) 成果を論文にしておくことが大切なようだ。そうすれば、次のプロジ

エクトでも優先的に声をかけてもらえるし、アカデミアにも職を得やすい。研究よりも開発の方が自分に向いており、そのような仕事がしたいと思えば、プロジェクトに参画していた企業が喜んで採用してくれるだろう。

### <博士の勧め>

これはポスドクそして上級研究者としての経験を通しての勧めだったので、時間的には前後するが、理研での専門的で難しい仕事を紹介する前に、簡単に触れておこう。要は、博士課程を修了して「ハカセ」になれば、就職や生活面でさほど心配することはないから、「博士に進んだら職がないという先入観は捨てよう」という勧めだ。とは言え、ハカセの道は、最初は任期制で不安定な場合が多い。修士で会社に就職した同級生が活躍しているのを見るのがつらい時期もあったそうだ。人生駆け出しの頃に多少出遅れ、不遇そうに見えることがあっても、長い目で見れば、納得さえできればいいのだ。

ハカセの要件は独立して仕事ができることだ。それには研究資金を自分で稼がなければならない。科研費等に応募することになるが、分かり易い申請書を書き上げ採択されるには、研究の腕とは別の技術がいる。科学技術の世界には国境がないので、ポスドク先が外国か国内かを問わず、英語からは逃れられない。流暢である必要はないが、英語は道具として使えるようにしておいた方がいい。企業に勤めた場合も、文章力・プレゼン力や英語力は必須だろう。魅力的な企画書を作成しなければ予算を付けて貰えないし、外国との交渉も多いからだ。

### <起業を目指している人こそ博士課程に！>

こう書いてくると『博士はやはり大変そうだ』との印象を与え、せっかくの高橋さんの熱演をだいなしにしてしまいそうなので、話は前後するが、講演の最後に出てきたスライドを引用しながら、「ハカセノスゝメ」の真意を紹介しておこう。

ベンチャー企業の社長と研究者の仕事を比較してみると（表 2）、研究を除けばほぼ同じだ。文系出

身の日本の起業家やビジネスマンは、学生時代は伸び伸びと過ごし、米国のビジネススクール等でしごかれて初めて目が覚めたという人が多いが、理系の場合は博士課程まで 9 年間鍛えられれば、ビジネススクール以上の力が付き、“ちょっと一癖ある社会人”になれる。博士課程は、起業（企業）を目指す人にとっても、他の人たちが持っていないものを身に付ける絶好のチャンスなのだ。

表 2. ベンチャーの社長と研究者の仕事の比較

	起業家		研究者
1			研究
2	ビジョンと戦略策定	↔	ビジョンと戦略策定
3	採用・組織作り 採用 教育&モチベーションの涵養	↔	採用・組織作り 学生&研究員の確保 教育&モチベーションの涵養
4	資金調達 銀行&ベンチャーキャピタル	↔	資金調達 外部資金への応募
5	出資者の説得	↔	上司の説得
6	対外交渉 宣伝 人脈作り 共同開発	↔	対外交渉 論文&学会発表 人脈作り 共同研究

### 理研へ、そして世界最高磁場の NMR 装置の 開発メンバーに

#### <どのようにして理研に職を得たか>

進学したい気持ちもあるが、博士課程に進むと就職しにくくなるのではないかと心配している学生のために、高橋さん自身の経験と見聞を披露してくれた。最近では博士課程やポスドクを対象にしたキャリア支援プログラムが動いているが、それでも学部・修士の時のような就活システムは整っていない。博士課程修了後は企業に勤めるかポスドクになるかが普通だが、ラッキーなケースでは大学の助教や公的な研究機関の研究者として採用される場合もある。教員が面倒を見てくれる場合もあれば放任の場合もあり、かつ分野にもよるので一概には言えないが、半分近くは、研究室や学会・研究会などを通して何らかのつながりのあるところに就職するそうだ。そんな中でも、理想的なのは、「鈴懸さん、今度ポスドクの募集を出すから応募してみない。今うちでは超伝導 NMR をやっていて、あなたのような極低温が得意な人に来

てもらえると助かるんだけど…」とオファーを受けたり、「鈴懸さんは、ずっと低温工学をやっていたんだよね。うちの会社、今そこに力を入れたいんだが、詳しい人がいなくてね…」と入社を打診されたりするケースだが、そのためには学会等で活躍し自分の存在を認知してもらっておく必要がある。高橋さんの場合は面倒見のいい教授で、「理研の知人が極低温技術を用いた NMR 装置を開発しようとしており、ポスドク研究員を探しているが興味は？」と打診された。贅沢は言うておれないので、「お願いします」と即答したが、極低温という共通点を除けば、「NMR？何それ？」状態で、一から勉強をし直さなければならなかった。

### <NMR の原理>

当時の高橋さんになったつもりで、“NMR？何それ？”状態を抜け出してみよう。冒頭で述べたように、原子核は微小な磁石として振舞う（図 1A）<sup>(注 1)</sup>。この磁石に磁場をかけると、磁場と同じ方向を向いた安定な状態（ $\alpha$  スピン）と反対向きの不安定な状態（ $\beta$  スピン）が生じる（図 2B）。この二つのエネルギー差に対応する高周波（波長域が FM ラジオや携帯電話と同じ電波なのでラジオ波といわれる）を外から与えるとエネルギーの低い状態から高い状態へと  $\alpha$ - $\beta$  遷移が起こる（図 1B, 2B, 2C）。この現象が核磁気共鳴 NMR (Nuclear Magnetic Resonance) で、外部磁場が強ければ強いほど  $\alpha$  スピンと  $\beta$ スピンのエネルギー差が大きくなり、得られるシグナル（共鳴スペクトル）も強くなる（図 2C）。微小磁石としての原子核の性質は、周りの電子状態に左右されるので、原子核周りの電子状態を調べることができる（図 1C）。すなわち化合物中の原子の結合状態（化学結合状態）を知ることができる。

NMR は最も弱いシグナルを検出する分析法としても名高い。高橋さんたちがどれぐらい微弱なシグナルを相手にしているかを理解するために、私たちの視覚と比較してみよう（表 3）。NMR のシグナル<sup>(注 2)</sup>を、私たちが最も多くの情報を得ている可視光と比べると、エネルギーにして百万分の 1 以下であることが分かる。気が遠くなりそうだが、得られる情報は大変有用なので簡単に諦めるわけにはいかない。病院の画像診断 MRI

(Magnetic Resonance Imaging)<sup>(注 3)</sup>も同じ原理に基づくと分かれば、その重要性を納得して貰えるだろう。

表 3. 可視光と NMR シグナルの比較

電磁波の種類	周波数 (Hz)	波長	エネルギー (eV)
可視光	10 <sup>15</sup> 程度	380 nm ∟ 770 nm	1.6~3.2
NMR シグナル (ラジオ波帯域の高周波)	3 × 10 <sup>7</sup> (30 M) <sup>*</sup> ∟ 3 × 10 <sup>9</sup> (3 G) <sup>**</sup>	10 cm <sup>**</sup> ∟ 10 m <sup>*</sup>	10 <sup>-7</sup> ~10 <sup>-6</sup>

### <超 1 GHz NMR システムの開発と高温超伝導磁石>

NMR の原理から明らかなように、強い磁石を使うほど感度と分解能が向上し、はっきりしたシグナルが得られる。強い磁石といえば超伝導磁石というわけで、その性能向上を巡って熾烈な国際競争が繰り広げられた。液体ヘリウム温度まで冷却すると電気抵抗がゼロになるという超伝導現象<sup>(注 4)</sup>を利用して、コイル<sup>(注 5)</sup>に大容量の電流を流し 20 T<sup>テスラ</sup> (NMR 対応では約 850 MHz) を超える強磁場を作り出す技術開発が続けられていた。

当時、横浜の理研では「タンパク 3000 プロジェクト」という巨大プロジェクトが動いていた。NMR を使ってタンパク質の立体構造を決める試みだったが、高橋さんは NMR 装置の検出器の開発に関わった。検出対象 (NMR の信号, 50 MHz~1 GHz) はラジオ波なので、最近目覚ましい進歩を遂げている携帯電話の電磁波技術が参考になったそうだ。

タンパク 3000 プロジェクトが終わりそうな頃に、直属の上司 (前田 秀明 NMR 施設長) が関係者と相談して物質・材料研究機構 (NIMS) を中心としたチームを作り JST の「先端計測分析技術・機器開発プログラム」という公募に応募した結果、次の大型プロジェクト「超 1 GHz NMR システムの開発」が採択され、高橋さんも参加することになった。この「先端計測分析技術・機器開発プログラム」は、島津製作所の田中耕一さんが質量分析技術の開発でノーベル化学賞 (2002) を受賞したことをきっかけ

けに始まったもので、かつ発明発見で終わらせないで製品で世界を制覇するまでやり抜く必要があるとの反省のもとに 2016 年度まで公募が行われた。

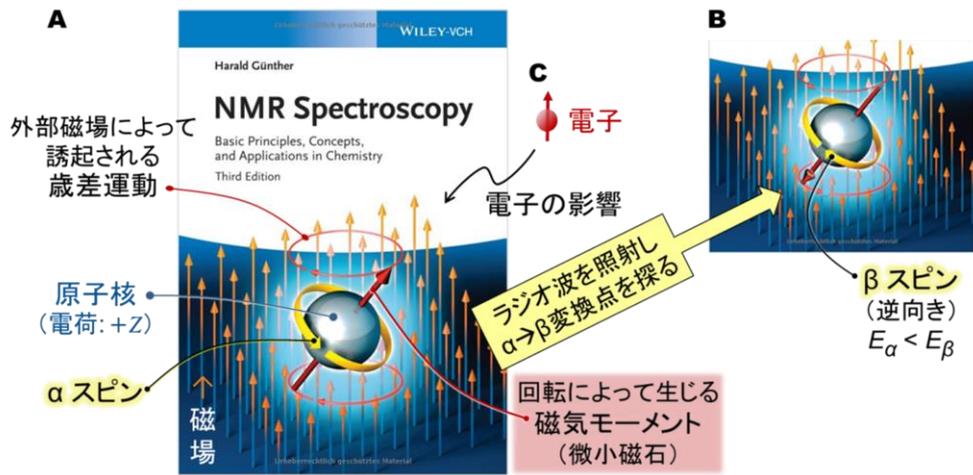


図 1. NMR の原理 [1]。A: 原子核はプラスに荷電した状態で回転している。必ずしも正しい表現ではないが、この回転によって磁場が生じるので、原子核は小さな磁石として振舞うことになる。この原子核に外部磁場をかけると、歳差運動を始める。B: 歳差運動の周期に合った振動数の電波を照射すると、そのエネルギーが吸収され、核(磁気モーメント)の向きが反転する。すなわち、安定な $\alpha$ スピンから、不安定でエネルギー準位の高い $\beta$ スピンへと遷移する。この現象を核磁気共鳴(NMR)と呼び、遷移の起こる電波の周波数を共鳴周波数と呼ぶ。共鳴周波数は通信に使われているラジオ波の帯域にある。C: 核の磁気モーメントは周辺の電子の影響を受けるので、共鳴周波数の微妙な変化から化学結合の状態を知ることができる。

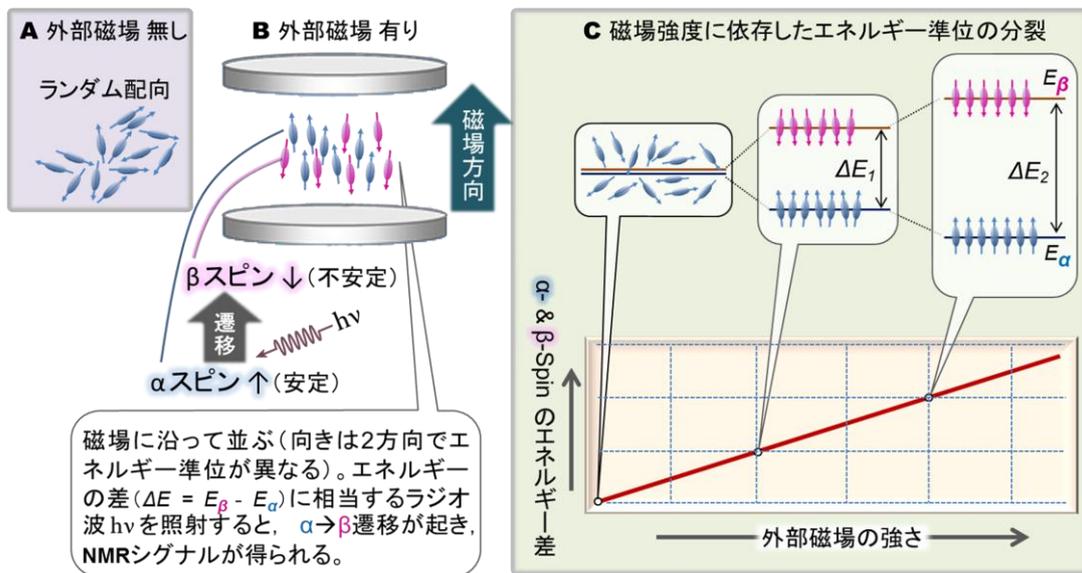


図 2. NMR の原理 [2]。A: 原子核の磁気モーメント(微小磁石としての原子核)は外部磁場がない状態ではランダムな方向を向いている。B: 外部磁場をかけると、磁場に沿って並ぶが、このとき $\alpha$ スピンと $\beta$ スピンの二つの状態に分れる。C: 外部磁場の強さに比例して、 $\alpha$ スピンと $\beta$ スピンのエネルギー準位の差が広がり、 $\alpha \rightarrow \beta$ 遷移を引き起こすラジオ波の共鳴周波数も高くなる。すなわち、NMR 測定の感度と分解能が向上する。

## 高温超伝導材料を利用した NMR の開発

- (1) 高温超伝導体は磁場に強いがもろい；  
もろさを克服して導線を作らなければならない

これまでに実用化されている金属系低温超伝導体（ニオブチタン NbTi とニオブ 3 スズ Nb<sub>3</sub>Sn）では到達できる磁場強度に限界があり、その上限は 1 GHz（1000 MHz ≈ 23.5 T）とされ、実際にその上限に近づきつつあった。金属系超伝導体は高磁場に弱く 1 GHz 近辺になると自分で作り出した磁場で自滅してしまうからだ。

1 GHz の壁を超えるために、高橋さんたちは、磁場に強いセラミックスの 1 種である高温超伝導体 <sup>ビスマス</sup>（Bi2223）<sup>（注 4）</sup> を用いることにした（図 3）。この材料ならば、1.5 GHz を目指せると考えられているが（図 4，赤エスカレーター），セラミックスゆえに非常に脆く、扱いが難しい。金属であれば引き伸ばしてワイヤにできるが、セラミックスでは不可能である。さらに、曲げられるようにするには薄くテープ状にするしかない。しかも内部の結晶の向きがそろっている必要があり、これを km オーダーで一つの欠陥もなく安定して製造することが難しい。今でも高温超伝導ワイヤの製造技術では、日本の電線メーカー 3 社が世界をリードしている。そして、これをきれいにコイルに巻く技術も必要だが、この難問はプロジェクトメンバーの企業（神戸製鋼所）が解決してくれた。

- (2) 磁場強度を均一にしなければならない；  
許されるバラツキは 10 億分の 1

NMR の信号（共鳴周波数）は磁場強度に比例して変動する（図 2C）。磁場が均一でないで本来ひとつの信号だったものが、あたかも複数の信号であるかのような誤情報を拾ってしまう。磁場の安定化技術が NMR の要といわれるゆえんだ。許されるバラツキは 10 億分の 1 というから、気が遠くなる。ここを主に担当したのが高橋さんが所属する理研のチームだ。磁場安定化装置と磁場補正装置を新たに開発することにより、空間的のみならず時間的（例えば連続 24 時間）にも安定な磁場を作り出すことに成功した。

- (3) 震災やリーダーの急死にもめげず、  
1 GHz 越えを達成 <sup>（注 6）</sup>

2006 年秋から 5 年計画でスタートしたプロジェクトも 5 年目に入り大詰めに迎えていた。待望の高温超伝導 NMR 装置がほぼ完成し（図 5），試運転のために液体ヘリウムを注入し終えたところで、東日本大地震（2011.3.11）に襲われた。筑波の物質・材料研究機構（NIMS）に設置されていた装置は、大きな揺れによって“振れ止めロッド”が破損し、損傷は心臓部にまで及んだ。高橋さんの脳裏には D2 の時の実験装置の故障の場面が <sup>よみがえ</sup> 蘇ったに違いない。大げさに言えば国の威信をかけたプロジェクトゆえに、地震を理由に中止することはできない。高橋さんたちは振出しに戻って装置を組み立て直すことにした。震災以外にもハプニング続きで満身創痍という感じだったが、それらのトラブルを奇抜なアイディアと物質・材料研究機構（NIMS）を中心とした強い意志で見事に乗り越え <sup>（注 6）</sup>，2014 年 10 月について 1.02 GHz（1020 MHz）という世界記録を打ち立てた <sup>（注 7）</sup>。気付いてみると、プロジェクトの申請段階から完成までの 10 年間一貫して開発現場にいたのは高橋さんを含めごく少数で、他の人たちは途中参加だったり入れ替わりだったそうだ。

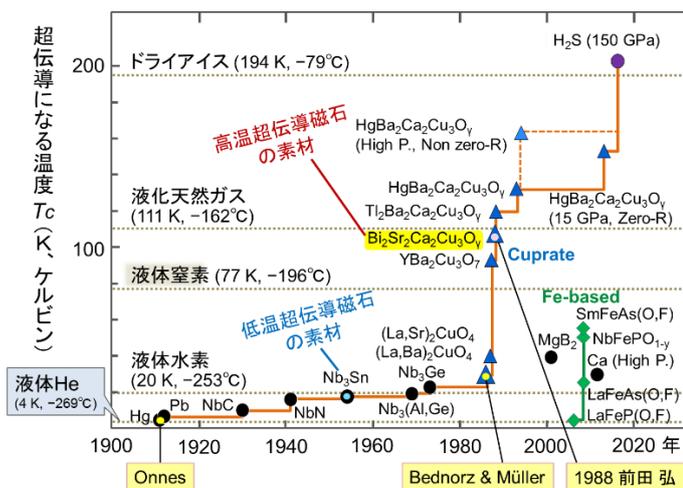


図 3. 超伝導材料の歴史。今回使用された Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>（Bi2223）は 1988 年に前田 弘によって開発された高温超伝導体。<sup>（注 4）</sup>

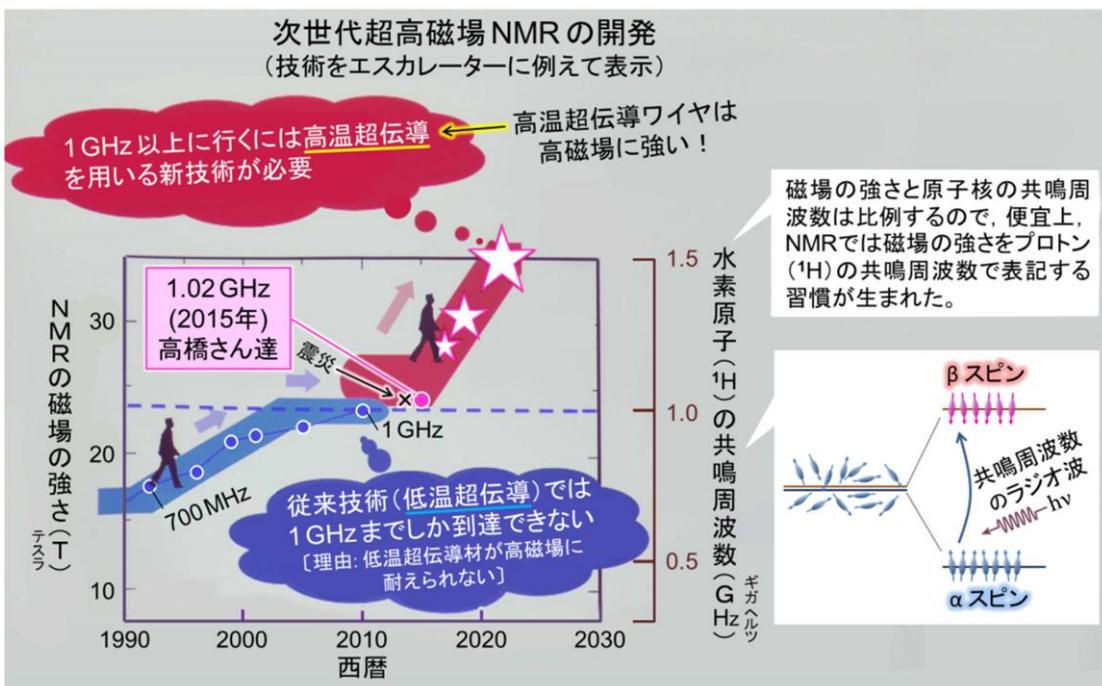


図 4. 磁場到達度で見た NMR 開発の歴史。次世代の超強磁場 NMR 装置を開発するには、高温超伝導磁石が不可欠だ。この技術では日本が一步先んじている。

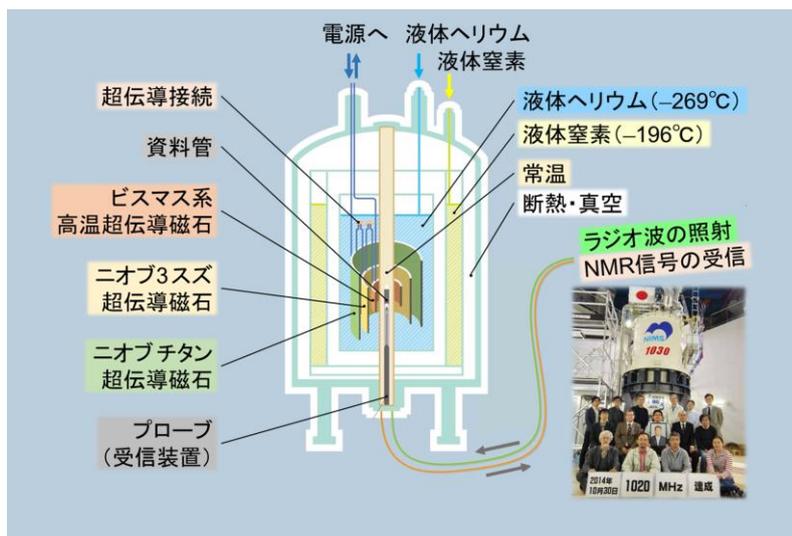


図 5. 1.02 GHz-NMR 装置の概要。磁場発生部は 3 層となっており、最内層に高温超伝導体が使われている。右下の記念写真には、完成直前の 2013 年 1 月に亡くなった物質・材料研究機構の木吉 司 (1959 ~2013) チームリーダーも額入り写真で写っている。

### 次世代型 NMR 装置の開発

上記のような経験を通して、「研究の腕を振るうための舞台をいかに整えるか」ということも大事な要素だと思い始めた高橋さんは、より主体的に関

われるプロジェクトを立ち上げることを真剣に考え始めた。そして高知大学の山田和彦特任講師 (当時) と相談して、若手中心のチームを編成し、JST の研究成果展開事業「先端計測分析技術・機器開発プログラム」(要素技術タイプ) に『全原子を測定対象とする次世代型 NMR 装置の開発』というテ

ーマで応募し採択された（2014～）。競争倍率は10倍だったそう。現在、高橋さんは分担研究者として高温超伝導 NMR プローブ（図5の受信装置）を開発中だ。

### まとめ

研究者に限らず、企業人にとっても、「仕事の舞台を自ら整える」努力は大切だろう。高橋さんは「指示待ちはダメ！」とも言っていた。この二つに“共鳴”できる人は博士課程に進もう。←こう要約してみたくなるような「ハカセノ、メ」だった。

「うまくいかなかった時、人生、割り切りが必要です。割り切りができていれば、よほどのことがない限り、精神的にまいることがない気がします。私の場合は、“博士が取れない、あるいは就職できない時は、アルバイトでやっていた塾の講師を続けなければいいのだから”とっていました」という高橋さんが、“割り切り人生”で手にしたハカセは高橋さんの想像以上に高橋さんの人生を充実したものにしてくれているのではないだろうか。

-----

(注1) 正確にはすべての原子核が磁気モーメント（磁力の大きさと向きを表すベクトル量、微小磁石とみなせる）を有するわけではない。原子核内では、陽子と中性子が回転（スピン）しており、陽子はお互いに逆向きのスピンをもつもの同士が対を形成している。中性子も同様に互いに逆向きのスピン対をつくる。従って、陽子と中性子のどちらか一方でも奇数であれば、スピン量子数  $I$  は  $1/2$ ,  $1$ ,  $3/2$  などとなる。酸素  $16$  ( $^{16}\text{O}$ ) のように陽子（8個）も中性子（8個）も偶数であれば、すべてのスピンが対を作っているため、スピン量子数  $I$  は  $0$  となる（磁気モーメントがゼロ）。陽子と中性子の数の合計は質量数であるから、 $^1\text{H}$  や  $^{13}\text{C}$  のように質量数が奇数であれば、スピン量子数  $I$  は  $1/2$ ,  $3/2$  などの半整数となる。質量数が偶数であれば、スピン量子数  $I$  は  $0$  か整数となる。スピン量子数  $I$  が  $0$  の核（例えば、 $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$  など）は磁石の性質を示さないため、NMR の測定対象にはならない。

(注2) 携帯電話・テレビ・ラジオ等と同じ領域の電磁波（ラジオ波）。

(注3) NMR（核磁気共鳴）画像診断と命名してもよかったのだが、一般人にとっては“核”が名前についていると何となく気持ち悪いだらうからと考えて、MRIにしたようだ。

(注4) 電気抵抗がゼロになる超伝導現象は、オランダの Onnes（1853～1926）によって、液体ヘリウム温度（ $-269^\circ\text{C}$ の極低温）にまで冷却した水銀を用いた実験で発見された（1911）。その後、より高い温度（ $-238^\circ\text{C}$ ）でも超伝導を示す銅酸化物（ $\text{La}_{1.85}\text{Ba}_{0.15}\text{CuO}_4$ ）がスイスの IBM 研究所で Bednorz & Müller によって発見され、高温超伝導フィーバーが起きた（1986、下図3）。現在では液体窒素温度以上でも機能する高温超伝導体が開発されている。その1つが1988年に前田 弘（1936～2014、物質・材料研究機構 NIMS）によって作られたビスマス（Bi）系超伝導体 **Bi2223**（ $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+d}$ ,  $T_c = -163^\circ\text{C} = 110\text{ K}$ , 図3の赤字）だ。Bi系超伝導体は構成元素の頭文字を取って BSCCO または構成元素のモル比から Bi2223 と呼ばれる。

(注5) ニオブチタン NbTi ワイヤやニオブスズ  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  ワイヤを多層巻にしたコイル。NbTi や  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ （上図3の青字）は金属系の低温超伝導体。

(注6) 「世界最高磁場 NMR—1,000 MHz の壁を超えて」、NIMS NOW 2016, No. 1, 1–14: “数々の困難に立ち向かいながらも、超えなければならなかった 1,000 MHz の壁とは？NMR は人類の未来に何をもたらすのか？最高磁場達成に執念を燃やしたプロジェクトチーム\*の証言をもとに、その開発の歴史と、世界最高磁場達成の裏側に迫る” ◆特別対談「超 1 GHz-NMR への挑戦」◆「NMR 装置を解剖する」の項ではイラストで超伝導磁石の構成などが解説されている（図5はそれを改変したもの）：外側から中心部に向かって、ニオブチタン超伝導磁石、ニオブ3スズ超伝導磁石、ビスマス系高温超伝導磁石が配置されている。◆多数の開発メンバーを代表して4人が対談形式でプロジェクトを振り返っている。“満身創痍の「超 1 GHz-NMR 装置」開発ヒストリー”として読み物にまとめたのは山田久美さん。

\*プロジェクトチームの構成機関・企業：株式会社 JEOL RESONANCE, ジャパン スーパーコンダクタテクノロジー株式会社 (JASTEC), 株式会社神戸製鋼所, 物質・材料研究機構, 理化学研究所

(注7) Kenjiro Hashi, Shinobu Ohki, Shinji Matsumoto, Gen Nishijima, Atsushi Goto, Kenzo Deguchi, Kazuhiko Yamada, Takashi Noguchi, Shuji Sakai, Masato Takahashi, Yoshinori Yanagisawa, Seiya Iguchi,

Toshio Yamazaki, Hideaki Maeda, Ryoji Tanaka, Takahiro Nemoto, Hiroto Suematsu, Takashi Miki, Kazuyoshi Saito, Tadashi Shimizu. Achievement of 1020 MHz NMR. *Journal of Magnetic Resonance* 256, 30–33, 2015.

(東京工業大学 博物館 資史料館部門 特命教授 広瀬茂久)