テーマ解説

超 1 GHz NMR システムの開発

—駆動用安定化電源システムの開発—

高橋 雅人^{*1,†}, 松本 真治^{*2}

Development of an NMR Spectrometer Operated beyond 1 GHz — Development of a Power-supply System for a Driven-mode NMR Magnet —

Masato TAKAHASHI^{*1,†} and Shinji MATSUMOTO^{*2}

Synopsis: Superconducting magnets are widely used in NMR spectrometers in order to achieve higher magnetic-field strength and stability. Especially, the magnetic-field stability of low-temperature superconducting (LTS) magnets commonly used is realized using a persistent current mode. Recent progress in high-temperature superconductors (HTS) and magnet technologies is promoting the development of magnets to exceed 1 GHz (23.5 T) limited by the low critical-current density of LTS in a high-magnetic field. However, there is still no superconducting joint for HTS to enable a persistent current mode. We have developed a 1,020 MHz (24.0 T) NMR using a $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (Bi-2223) innermost coil with an external power supply. The driven-mode operation of a large-scale magnet for the high-resolution NMR was a new challenge requiring related problems to be investigated. A highly stabilized power supply and equipment for power outage have been developed for the high-resolution solution NMR and long-term operation.

Keywords: high-temperature superconductors, high-resolution NMR, external power supply, magnetic-field stability, power outage

1. はじめに

核磁気共鳴 (NMR) 装置では、磁場を得るために超伝導磁石が広く利用されている。これは、超伝導磁石により非常に高い磁場を得ることができるためである。しかし、見過ごされやすいもう一つの理由がある。それは、非常に高い安定度を持つ磁場を永久電流モードによって得ることができるからである。永久電流モードによって得られる磁場変動幅は、通常 0.01 ppm/h 以下である。

一方、低温超伝導 (LTS) 線は高磁場中の臨界電流密度が実用に十分ではない。このため、発生可能な磁場強度に限界がありその値がおよそ 1 GHz (23.5 T) であるため、

NMR 業界では 1 GHz の壁と認識されてきた。これを突破するプロジェクトとして 2006 年に始まったのが、科学技術振興機構 先端計測分析技術・機器開発プログラムの「超 1 GHz NMR システムの開発」^{1,2)}である。つくば市の物質・材料研究機構に設置された 920 MHz (21.6 T) NMR を開発に利用した。すなわち、すべてが低温超伝導コイルである 920 MHz NMR 磁石のうち、最も経験磁場が高い位置にある最内層コイルを高温超伝導 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (Bi-2223) のコイルに交換することによって高磁場化を行った^{3,4)}。その結果、高分解能 NMR 測定を 1020 MHz (24.0 T) で行うことに成功した⁵⁻⁷⁾。

高温超伝導 (HTS) 磁石では、実用的な超伝導接続が実現されていないため、永久電流モードを想定せずに開発が進められた。つまり、高安定化された磁石用外部電源により電流を維持する新しい手法の開発を行った。しかし、プロジェクト開始時には、この手法により高分解能の溶液 NMR を行うことが可能か不明であった。さらに、外部電源により永久電流モードを持たない大型の超伝導磁石を長期間にわたって運用するためには、停電や電源故障の対策が必要であることが明らかになった。本稿では、主にこの 2 点について紹介する。

Received July 6, 2016

^{*1} 理化学研究所ライフサイエンス技術基盤研究センター
〒230-0045 神奈川県横浜市鶴見区末広町 1-7-22
Division of Structural and Synthetic Biology, Center for Life
Science Technologies, RIKEN, 1-7-22, Suehiro-cho, Tsurumi-ku,
Yokohama, Kanagawa 230-0045, Japan

^{*2} 物質・材料研究機構先端材料解析研究拠点
〒305-0003 茨城県つくば市桜 3-13
National Institute for Materials Science, 3-13, Sakura, Tsukuba,
Ibaraki 305-0003, Japan

[†] E-mail: masato.takahashi@riken.jp
DOI: 10.2221/jcsj.51.335

Fig. 1 Examples of NMR spectra influenced by a magnetic-field fluctuation. The fluctuation frequency is (a) less than 1 Hz and (b) 50 Hz. Figure adapted from 8).

2. 電源の高安定化

2.1 電流変動による NMR スペクトルへの影響

磁石用外部電源から供給される電流が変動することによって、磁場の値が変化する。NMR の共鳴周波数は磁場強度に比例するため、磁場の変動に敏感であり ppb (10^{-9}) の磁場変化を検知できる。逆を言えば、このレベルの変動幅でも NMR スペクトルへの影響が発生する。特に溶液 NMR では非常に先鋭な NMR 信号 (スペクトル半値幅 1 Hz 以下 : 1020 MHz NMR では 1 ppb 以下に相当) を取得する必要がある。したがって、磁場の変動を打ち消す磁場ロック機構が備わっている。これは、測定対象ではない NMR 核種 (重水素がよく用いられる) から発生する NMR 信号の周波数を一定に維持することによって行われる。周波数 (磁場) を一定に維持するためには、室温ボアに取り付けた電磁石を用いる。通常の NMR 分光計に備わっている磁場ロック機構は、 ± 1.5 ppm (10^{-6}) 程度の磁場変動幅が許容限度であり、これ以上変動幅が大きくなると磁場を一定に維持できなくなる。したがって、磁石用外部電源が供給する電流の変動幅もこれ以下にする必要がある⁸⁾。

Fig. 2 Schematic drawing of an instrumentation system that measures a magnetic-field fluctuation using a reciprocal frequency counter. Figure adapted from 9).

NMR スペクトルに大きく影響を与える磁場変動は、変動周波数が 1 Hz 以下の変動と 50/60 Hz の変動の 2 種類がある。電源は電流を一定に維持するために、非接触式の直流電流トランスを用いた電流センサ (Direct-Current Current Transformer: DCCT) など電流値を測定しながら電源内部でフィードバック制御を行っている。また、気温の変化などにより電源内部の素子の特性や電線の抵抗が変化すると、変動周波数が 1 Hz 以下のゆっくりした変動の原因となる。一方、磁石用外部電源は商用の 50/60 Hz の交流電源から直流を作り出す仕組み上、わずかに交流成分が出力に重畳されている。これによる影響が NMR スペクトルに現れる。

これらの影響を受けた NMR スペクトルの例を **Fig. 1** に示す⁸⁾。Fig. 1(a)では、磁場変動の影響を受けて、測定時間中に同じ位置にあるべきピークが左右に動いてしまっていることがわかる。一方、50 Hz の変動周波数を持つ磁場変動の影響を受けると、NMR スペクトルは Fig. 1(b)に示すようになり、主ピークの両側、ちょうど 50 Hz 離れた位置に偽のピーク (サイドバンド) が発生する。溶液 NMR の標準的な測定時間 1 秒の間に磁場が変動周波数 50 Hz で変動すると、NMR の共鳴周波数そのものが一緒に変化してしまい周波数変調が行われたことになるからである。周波数変調による変調指数 h は

$$h = \frac{\Delta f}{f_m} = \frac{\Delta B \gamma}{2\pi f_m} = \frac{\Delta B}{B_0} \frac{f_0}{f_m} \quad (1)$$

で表すことができる。ここで、最大周波数偏移 Δf 、磁場変動幅を ΔB 、変調信号周波数 (50/60 Hz) を f_m 、超伝導磁石が作る強磁場の強度を B_0 、そのときの測定核種の NMR 信号の共鳴周波数を f_0 とする。また、測定核種の核磁気回転比を γ とすると NMR においては常に $f = B\gamma/2\pi$ の関係が成り立つ。変動周波数 50 Hz の変動を磁場ロック機構によって打ち消すことが可能であればよいが、実際にはそこまで速い変化に追随することは不可能である。したがって、さきほどの変動周波数 1 Hz 以下の磁場変動とは異なり、磁石用外部電源の性能のみで一定のレベル以下にする必要

Fig. 3 Magnetic-field fluctuations of a driven-mode NMR magnet using (a) a commonly used power supply to charge an LTS magnet, (b) a stabilized air-cooled power supply, and (c) a stabilized water-cooled power supply.

がある。NMR スペクトル上で、サイドバンド信号のピーク高さは、主ピークの $h/2$ になる。この許容値のおよその目安として 0.05% を設定すると、許容される磁場変動幅の比 $\Delta B/B_0$ は 500 MHz (11.74 T) NMR でおよそ 10^{-10} になる。

Fig. 4 Spectra of current fluctuation amplitude ratio that occurred in (a) the 500 MHz NMR magnet, and (b) the 1,020 MHz NMR magnet. Figure adapted from 8).

2.2 変動周波数 1 Hz 以下における電源の安定度評価

上記で述べた変動周波数 1 Hz 以下と 50 Hz の電流変動の許容値以下でなければ、電源駆動の高温超伝導磁石で高分解能の溶液 NMR のスペクトルを取得することはできない。500 MHz (11.74 T) NMR 磁石に電流リードを取り付け、磁石用外部電源により励磁したものを用意して実験を行った。

励磁用の外部電源として、永久電流モードの NMR 磁石納入時のときのみ利用する通常の超伝導磁石用電源、空冷の安定化電源 (IDX 社)、水冷の安定化電源 (Danfysik 社 Model 854) の 3 種類を用意した。

ここで問題となっている変動周波数 1 Hz 以下の磁場変動は非常に変動幅が小さくホール素子などでは測定できない。一方、NMR 信号の共鳴周波数は磁場強度に比例し、磁場変動を周波数の変化として測定することができる。そこで、周波数カウンタを用いた NMR 分光計を開発し、これを用いて測定を行った (Fig. 2) ⁹⁾。NMR 信号を励起用の高周波パルスを出力する送信系と受信した NMR 信号を増幅、フィルタリングを行い周波数カウンタで読み込む受信系を用意した。これらと信号経路を切り替えるスイッチ

Fig. 5 WATERGATE NOESY spectrum for 2 mM ^{13}C - and ^{15}N -labeled chlorella ubiquitin in 90% H_2O and 10% D_2O obtained by (a) a conventional 500 MHz LTS NMR magnet in persistent mode, and (b) the 500 MHz LTS/HTS NMR magnet in driven-mode. The mixing time for NOESY was 0.2 s and the repetition time was 1 s. The number of signal points along the t_2 axis was 1,024, while that along the t_1 axis was 512. The number of scans was 16. The acquisition time was 3 h. Figure adapted from 10).

をコンピュータで制御し、受信信号の周波数を周波数カウンタによって高速に読み取ることによって周波数の変動を記録した。

その結果を **Fig. 3** に示す。通常の励磁電源では、30 分の間に 10 ppm 以上、空冷の電源では 1 ppm、水冷の電源では 0.2 ppm の磁場変動幅であった。このほかに気温などによって 24 時間単位で磁場変動することを考えると、空冷の電源で磁場ロックを維持することは難しい。

2.3 変動周波数 50 Hz における電源の安定度評価

変動周波数 50/60 Hz の磁場変動については、より簡便な方法で評価可能である。磁石用外部電源により磁石を励磁した状態でコイル両端の電圧を測定する。このデータをフーリエ変換することで電圧スペクトル（磁場変動の角周波数成分 ω ごとの電圧変動幅） $\Delta V(\omega)$ を求めることができる。これを以下の式により電流スペクトル $\Delta I(\omega)$ に変換できる。

$$\Delta I(\omega) = \frac{\Delta V(\omega)}{j\omega L} \quad (2)$$

ここで、 j は虚数、 L は超伝導磁石のインダクタンスである。超伝導磁石を流れる電流 I_0 で割ると磁場変動周波数成分ごとの電流変動幅の比 $\Delta I(\omega)/I_0$ が算出できる。これはさきほどの $\Delta B/B_0$ と等価である。

コイル両端電圧を 500 samples/s で 600 秒測定し、それを上記の手法により電流変動幅の比に変換した。磁石用外部電源には上記で選択した Danfysik 社の Model 854 を用いた。500 MHz (11.74 T) LTS/HTS NMR 磁石（インダクタンス 76 H）を定格電流 145 A で運転した場合の電流変動幅の比を **Fig. 4(a)** に示す⁸⁾。変動周波数 50 Hz の電流変動幅が基準値よりも少し大きいものの、その他の点においては非常に良く電流変動が抑制されている。1020 MHz (24.0 T) LTS/HTS NMR 磁石（インダクタンス 1155 H、定格 240.5 A）を 193 A で運転した場合の電流変動幅の比を **Fig. 4(b)** に示す。この 2 つを比較するとインダクタンスが大きいほど電流の変動を抑制できることがわかる。

2.4 NMR による評価

先端計測プロジェクトにおいては、外部電源駆動による NMR 磁石を用いて、ユーザーが満足できる NMR スペクトルが取得可能か早急に結論を出す必要があった。そこで、Danfysik 社の Model 854 を用いて励磁した 500 MHz (11.74 T) LTS/HTS NMR 磁石を用いてさまざまな NMR 測定を行った¹⁰⁾。

まず、磁場変動を長期にわたって ± 1.5 ppm 以下に抑制できれば、磁場ロックが可能である。最適な磁場ロックが得られるように、磁場ロックにおけるフィードバックのパラメータの最適化を行った。長時間 NMR 測定を行い、従来型の LTS 磁石で取得した NMR スペクトルと比較した。その結果を **Fig. 5** に示す¹⁰⁾。両者にわずかな差異があるものの実用上問題のないものである。したがって、高安定化された水冷の磁石用外部電源を用いれば、電源駆動による NMR 磁石でも実用上問題のない高分解能の溶液 NMR スペクトルが取得可能であることを証明できた。この結果は当時の NMR 業界に大きなインパクトがあった。

1020 MHz NMR では上記の磁石用外部電源を磁石のインダクタンスに合わせて調整して励磁を行った。同様に、磁場ロックが可能であり、良好な NMR スペクトルを取得できた。詳細については他の文献を参照されたい^{6,7)}。これらの成果は、高温超伝導磁石を用いた NMR や MRI 開発の可能性を大きく広げるものである。

3. 停電や電源故障への対策

3.1 停電対策

停電対策用の瞬時電圧低下補償装置（ニチコン社 CY2014R0K322887Z）および非常用発電機（東京電機社 TYGP60G）の仕様を **Table 1** に示す。この 2 つの装置を

Table 1 Equipment for power outage¹¹⁾

Equipment		
Momentary voltage drop compensator	Input	
	Voltage	200 Vac, 3-phase
	Output	
	Voltage	200 Vac, 3-phase
	Current	11.5 A
	Rated capacity	4 kVA
Emergency generator	Output time	15 s
	Engine	
	Output	57.8 kW
	Fuel	Diesel
	Generator	
	Voltage	200 Vac, 3-phase
Commercial power	Rated capacity	60 kVA
	Voltage	200 Vac, 3-phase

組み合わせることにより初めてさまざまな事象に対応して連続的な停電対策が可能である¹¹⁾。

瞬時電圧低下補償装置は、蓄電池を備えており瞬時電圧低下（瞬低）対策および停電対策として導入した。本装置は、停電時、15 秒間、3 相 AC 200 V 電源を直流高安定度磁石用外部電源に供給する設計になっている。本装置が供給できる電流は、最大 AC 11.5 A である。商用電力の電圧や周波数が一瞬乱れる瞬時電圧低下程度であれば、この装置のみで対処可能である。つまり、瞬時電圧低下補償装置は、充電された蓄電池の電力を用いて正常な波形の交流電力を連続的に出力可能になっている。一方で、15 秒以上商用電力の供給が止まった場合この装置だけでは対処できない。

もう一つの停電対策装置である非常用発電機は、もともと、停電時に 920 MHz 高分解能 NMR 磁石の冷却システムを維持するために準備された¹²⁾。1020 MHz NMR 磁石では、停電時に冷却系、磁石用外部電源、および冷却水用チラーに電源を供給する。冷却水は、磁石用外部電源に使用されている。非常用発電機が電源を供給するまでに、停電発生後、10 秒を必要とする。非常用発電機が始動するまでは、瞬時電圧低下補償装置が磁石用外部電源に電力を供給する設計である。

磁石用外部電源への商用および非常用発電機からの電力供給を Fig. 6 に示す。商用電力（通常時）または非常用発電機電力（停電時）は、瞬時電圧低下補償装置を通して、磁石用外部電源に供給される。停電発生後 15 秒間は、蓄電池を備えた瞬時電圧低下補償装置が電力を供給し、その後、非常用発電機が電力を供給する。停電時、電力供給が瞬時電圧低下補償装置から非常用発電機へとリレーされ、磁石用外部電源は間断なくコイルに電流を供給できる仕組みとなっている。

Fig. 6 Diagram of the power for a dc external power supply through a momentary voltage drop compensator. Figure adapted from 11).

この仕組みは、瞬時電圧低下に対しても同様に作動し、10 秒で非常用発電機に切り替わる。瞬時電圧低下が起こる要因の多くは落雷によるものである。とくに NIMS 桜地区の電力供給上流側は落雷が多い地区である。落雷は連続して起こることが多く、瞬時電圧低下補償装置作動後、蓄電池が充電される前に 2 回目の瞬時電圧低下が起こる危険性がある。通常は復電後自動で商用電力に復帰するが、この自動復帰を行わない設定も可能な仕組みとした。この場合、安全が確認されるまで非常用発電機で電力を供給することが可能である。

3.2 磁石用外部電源の故障への対策

磁石用外部電源が不具合を起こし、運転電流が遮断された場合、従来通りの仕組みであれば保護回路のダイオードが作動する。これを防ぐためにコイル電流を安全に迂回させる安全スイッチを設置した。この安全スイッチが作動するとコイル電流は、Fig. 6 に示した、主コイル、安全スイッチ (S2)、回路抵抗 (R) からなる安全回路を減衰しながら流れることになる。回路抵抗は、定格のコイル電流が流れても、主コイルの保護回路のダイオードが作動しないように低減化した。停電時に非常用発電機や瞬時電圧低

下補償装置の不具合が発生した場合、磁石用外部電源の遮断を引き起こし、安全スイッチを閉じることとなる。

安全回路でコイル電流を迂回させている間、コイル電流は、安全回路抵抗 (R) と主コイルのインダクタンス (L) により決まる時定数 (L/R) で減衰する。1020 MHz NMR 磁石には、永久電流モードで運転される超伝導シムコイルが設置されている。超伝導シムコイルは主コイルの外側に設置され磁場の均一度を調整する。これは、主コイルとは別に電源が用意され個別に電流値を制御することによって行われる。また、調整後は永久電流モードになっている。磁石用外部電源によって励磁された主コイルと超伝導シムコイルは磁氣的に結合している。よって、超伝導シムコイルの永久電流モード運転中、主コイル電流の減衰による磁場変動は、超伝導シムコイル中に誘導電流を生じさせる。

1020 MHz NMR 磁石には、軸方向超伝導シムコイル Z0、Z1、Z2 が設置されている¹²⁾。主コイル電流の減衰が大きな影響を及ぼすのは、主コイルとの相互インダクタンスが 58 H の Z0 シムコイルである。Z0 シムコイルは、 ± 20 A の範囲で運転可能である。1020 MHz NMR 磁石運転中は、Z0 シムコイルには電流が通電されていないが、超伝導スイッチが閉じられた状態であるため、主コイル電流の減衰により、誘導電流が発生する。

主コイル電流が 1 A 減衰すると、Z0 シムコイルには、20 A の誘導電流が発生する。回路抵抗 $R=2.08 \times 10^{-3} \Omega$ 、 $L=1155$ H より、主コイルに 250 A 通電している状態で、安全スイッチが閉じられ、主コイル電流の迂回が始まると、2160 秒で、Z0 シムコイル内に 20 A の電流が誘起される。

Z0 シムコイルのクエンチが、主コイルのクエンチを引き起こすので、主コイル電流の減衰を可能な限り遅くしたほうがよい。また、主コイル電流の減衰を速やかに停止させるか Z0 シムコイルの永久電流スイッチを開きシムコイル内に誘導された電流を減衰させる必要がある。

1020 MHz NMR 磁石には、クエンチ保護回路が設置されている。LTS コイルと HTS コイルからなる主コイルの保護方法が検討された¹³⁾。主コイルはいくつかのセクションに分割され、各セクションには、ダイオードと保護抵抗がコイルに並列に接続されている。主コイルには、ダイオードが並列に接続されている。磁石用外部電源の不具合により電流供給が遮断されたにも関わらず、安全スイッチが不具合により閉じられなかった場合、主コイル電流が安全回路に迂回できない。このときは、最終的な保護回路であるダイオードと保護抵抗が作動することになる。

3.3 停電の発生

2015 年 4 月 15 日 18 時 33 分、落雷により、物質・材料研究機構桜地区では、停電が発生した。1020 MHz NMR 磁石は、減磁工程中であり、主コイル電流は、235.3 A であった。停電時、瞬時電圧低下補償装置に不具合が発生し、磁石用外部電源は電流供給を遮断した。その日の減磁作業

が終了した後であったため、超伝導シムコイルは永久電流モードになっていた。しかし、停電の際にはシムコイルの永久電流スイッチを開くための仕組みを開発していたため、シムコイル内の誘導電流の増加を阻止することができた。

停電時、瞬時電圧低下補償装置に不具合が発生すると同時に、安全スイッチが閉じられ、主コイル電流を安全回路へ迂回されることができた¹¹⁾。非常用発電機の稼働後、瞬時電圧低下補償装置と磁石用外部電源を再起動させ、コイル保護回路を作動させることなく、3670 秒後、主コイル電流を 233.4 A の時点で再び制御することができた。

1020 MHz NMR 装置による、高分解能 NMR 測定中には、幸い、停電は発生しなかった。測定終了後、減磁中に起こった落雷による停電において、瞬時低電圧補償装置に過電流の不具合が発生し、磁石用外部電源によるコイルへの電流供給が遮断されたが、コイルをクエンチさせることなく、再び、磁石用電源でコイル電流を制御することができた。

4. まとめ

世界最高磁場 1020 MHz LTS/Bi-2223 NMR (超 1 GHz NMR) を開発し、高分解能 NMR の取得と半年以上の長期運転を行った。実用的な超伝導接続技術が開発されていない高温超伝導磁石では永久電流モードで運転できない。そのため磁石用外部電源による定常的な励磁が必要になる。高分解能 NMR を行うためには、変動周波数 1 Hz 以下で電流変動幅が ± 1 ppm (10^{-6}) 以下、変動周波数 50/60 Hz で電流変動幅が 0.1 ppb (10^{-10}) 以下であることが重要である。これを行うためには、極めて高安定化された水冷の電源が必要である。さらに、長期運転を行うために、瞬時電圧低下、停電、電源故障対策用の瞬時電圧低下補償装置、非常用発電機、安全回路が新たに必要である。

本研究は、国立研究開発法人科学技術振興機構先端計測分析技術・機器開発プログラム「超 1GHz-NMR システムの開発」の一環として実施された。NMR システムの開発は、株式会社神戸製鋼所および日本電子株式会社と共同で実施され、磁石の運転に際し、国立研究開発法人物質・材料研究機構強磁場ステーションに協力いただいた。

参 考 文 献

- 1) T. Kiyoshi, A. Otsuka, S. Choi, S. Matsumoto, K. Zaitzu, T. Hase, M. Hamada, M. Hosono, M. Takahashi, T. Yamazaki and H. Maeda: "NMR upgrading project towards 1.05 GHz," IEEE Trans. Appl. Supercond. **18** (2008) 860–863
- 2) T. Kiyoshi, S. Choi, S. Matsumoto, K. Zaitzu, T. Hase, T. Miyazaki, M. Hamada, M. Hosono and H. Maeda: "Bi-2223 innermost coil for 1.03 GHz NMR magnet," IEEE Trans. Appl. Supercond. **21** (2011) 2110–2113

- 3) G. Nishijima, S. Matsumoto, K. Hashi, S. Ohki, A. Goto, T. Noguchi, S. Iguchi, Y. Yanagisawa, M. Takahashi, H. Maeda, T. Miki, K. Saito, R. Tanaka and T. Shimizu: "Successful upgrading of 920-MHz NMR superconducting magnet to 1020 MHz using Bi-2223 innermost coil," IEEE Trans. Appl. Supercond. **26** (2016) 4303007
- 4) G. Nishijima, S. Matsumoto, K. Hashi, S. Ohki, A. Goto, T. Noguchi, S. Sakai and T. Shimizu: "Operation of 1020-MHz NMR superconducting magnet," IEEE Trans. Appl. Supercond. **26** (2016) 4303304
- 5) S. Iguchi, Y. Yanagisawa, M. Takahashi, T. Takao, K. Hashi, S. Ohki, G. Nishijima, S. Matsumoto, T. Noguchi, R. Tanaka, H. Suematsu, K. Saito and T. Shimizu: "Shimming for the 1020 MHz LTS/Bi-2223 NMR magnet," IEEE Trans. Appl. Supercond. **26** (2016) 4303507
- 6) K. Hashi, S. Ohki, S. Matsumoto, G. Nishijima, A. Goto, K. Deguchi, K. Yamada, T. Noguchi, S. Sakai, M. Takahashi, Y. Yanagisawa, S. Iguchi, H. Maeda, R. Tanaka, T. Nemoto, H. Suematsu, T. Miki, K. Saito and T. Shimizu, "Achievement of 1020 MHz NMR," J. Magn. Reson. **256** (2015) 30–33
- 7) K. Hashi, K. Deguchi, T. Yamazaki, S. Ohki, S. Matsumoto, G. Nishijima, A. Goto, K. Yamada, T. Noguchi, S. Sakai, M. Takahashi, Y. Yanagisawa, S. Iguchi, H. Maeda, R. Tanaka, T. Nemoto, H. Suematsu, J. To, J. Torres, K. Pervushin and T. Shimizu: "Efficiency of high magnetic fields in solid-state NMR," Chem. Lett. **45** (2016) 209–210
- 8) Y. Yanagisawa, H. Nakagome, M. Hosono, M. Hamada, T. Kiyoshi, F. Hobo, M. Takahashi, T. Yamazaki and H. Maeda: "Towards beyond-1 GHz solution NMR: Internal ^2H lock operation", J. Magn. Reson. **192** (2008) 329–337
- 9) M. Takahashi, Y. Ebisawa, K. Tennmei, Y. Yanagisawa, M. Hosono, K. Takasugi, T. Hase, T. Miyazaki, T. Fujito, H. Nakagome, T. Kiyoshi, T. Yamazaki and H. Maeda: "Towards a beyond-1GHz solid-state NMR: External lock operation in an external current mode for a 500 MHz NMR", Rev. Sci. Instrum. **83** (2012) 105110
- 10) Y. Yanagisawa, H. Nakagome, K. Tennmei, M. Hamada, M. Yoshikawa, A. Otsuka, M. Hosono, T. Kiyoshi, M. Takahashi, T. Yamazaki and H. Maeda: "Operation of a 500 MHz high temperature superconducting NMR: Towards an NMR spectrometer operating beyond 1 GHz", J. Magn. Reson. **203** (2010) 274–282
- 11) S. Matsumoto, T. Kiyoshi, G. Nishijima, K. Hashi, M. Takahashi, T. Noguchi, H. Maeda and T. Shimizu: "Equipment for power outage in operation of driven-mode NMR magnet," IEEE Trans. Appl. Supercond. **26** (2016) 4301004
- 12) T. Kiyoshi, A. Sato, T. Takeuchi, K. Itoh, S. Matsumoto, O. Ozaki, K. Fukushima, H. Wada, M. Yoshikawa, T. Kamikado, S. Ito, T. Miki, T. Hase, M. Hamada, S. Hayashi, Y. Kawate and R. Hirose: "Persistent-mode operation of a 920 MHz high-resolution NMR magnet," IEEE Trans. Appl. Supercond. **12** (2002) 711–714
- 13) O. Ozaki, T. Kiyoshi, S. Matsumoto and H. Wada: "Quench protection method of HTS and LTS hybrid magnet system," IEEE Trans. Power and Energy **121** (2008) 1276–1282

高橋 雅人

1975 年 2 月 16 日生。1998 年東京工業大学工学部機械宇宙学科卒業。2003 年同大学大学院総合理工学研究科創造エネルギー専攻 博士（工学）課程修了。2003 年理化学研究所勤務。主に NMR 装置開発に従事。低温工学・超電導学会、日本核磁気共鳴学会会員。博士（工学）。

松本 真治

1968 年 5 月生。1992 年大阪大学基礎工学部物性物理工学科卒業。1998 年同大学大学院基礎工学研究科後期博士課程修了。1999 年科学技術庁金属材料技術研究所（現 国立研究開発法人物質・材料研究機構）勤務。強磁場発生技術研究に従事。低温工学・超電導学会、電気学会会員。博士（理学）。