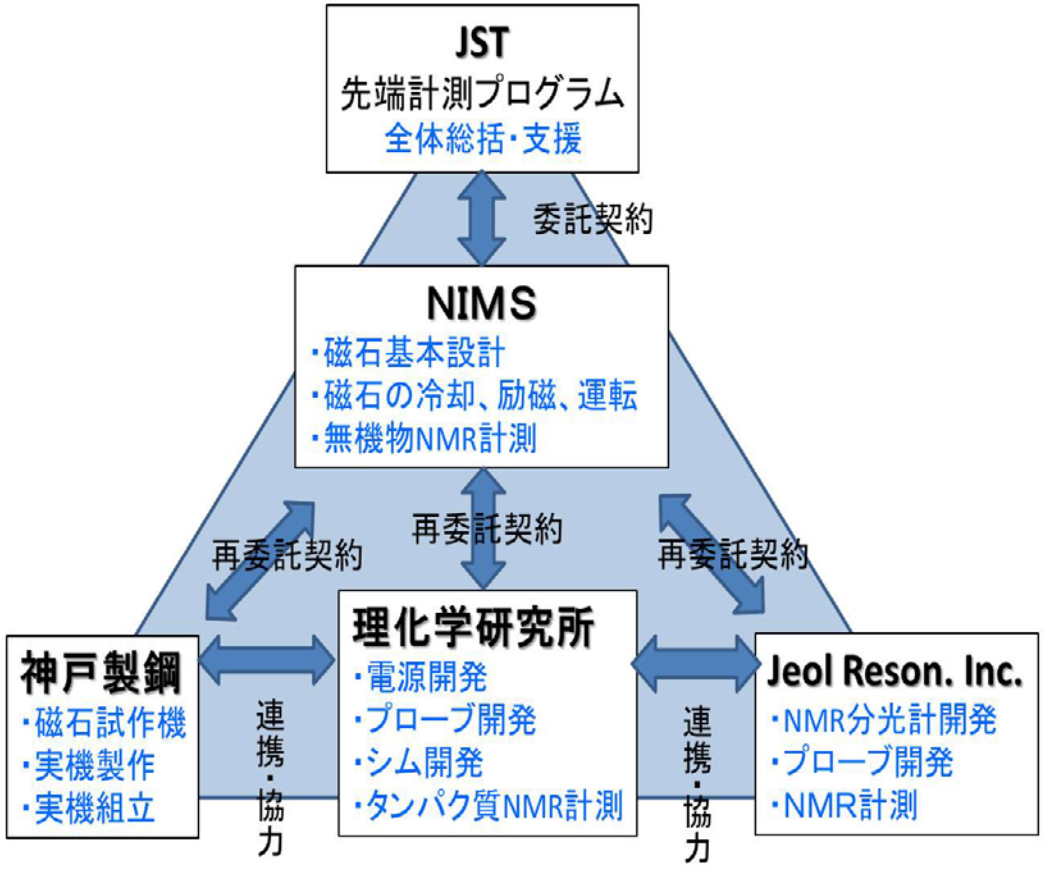
第15回NIMSフォーラム
東京国際フォーラム2015年10月7日

世界最高磁場NMRの開発と応用

清 水　禎
shimizu.tadashi@nims.go.jp
物質・材料研究機構（NIMS）
極限計測ユニット・強磁場NMRグループ
中核機能部門・強磁場ステーション

世界最高磁場NMR開発の目標と実施体制

開発目標
従来技術の壁(1000MHz)を超えるため
高温超伝導線材を世界で初めて使い
世界最高磁場のNMRを実現する



一家に1枚

磁場と超伝導

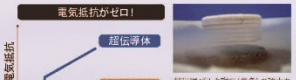
MAGNETIC FIELD & SUPERCONDUCTIVITY

磁場って何？

温度や湿度や圧力などと違い、磁場は感じることができません。しかし、磁場は、コンパスの針を動かしたり、砂鉄を集めたりといった、不思議な力を持っています。また、その強さは、中性子星の巨大な磁場から人体が発する非常に弱い磁場まで、20 桁以上という非常に広い範囲にわたっています。じつは、この見えない磁場に環境も社会も支えられているのです。

超伝導って何？

今からちょうど 100 年前の 1911 年に、オランダのオンネスは、水銀の電気抵抗が -269℃以下でゼロになる「超伝導現象」を見つけました。この現象を生じるものを超伝導体といい、電流を流しても発熱せず省エネルギーです。また、高密度の電流を流せるので強力な電磁石になります。液体窒素 (-196℃) の冷却で使える高温超超伝導体も発見され、その実用化も間もなくです。



超伝導バルク磁石（黒色）の強力な磁場で浮上する永久磁石（白色）。超伝導バルク磁石は強力な磁石として、ベアリング、フライホイール、磁気分離などに使えます。

磁場が支える私たちの世界

超伝導が切り拓く未来

磁場 強

単位T(テスラ)1T＝10000G(ガウス)

中性子星がつくる宇宙最強の磁場 1億T

人工的につくれる最強磁場 2500T

10^{5} 100000

10^{7}

10^{-5} 0.00001

10^{-10} 0.0000000001

10^{-15} 0.000000000000001

弱

100T以下 電磁石は技術の要

鋼鈑などをコイルにして電流を流すと、電磁石になります。モーターをはじめいろいろな工業製品に使われています。超強力磁石は強い磁場を長い時間発生でき、最高磁場は 45 Tです。また、パルス磁石はごく短い時間だけ強い磁場を発生し 100 Tに達するほか、磁場の強い空間を爆発によって圧縮する方法では 2500T を発生します。

超強力磁石

1.4T以下 暮らしを支える永久磁石

フェライト磁石、アルニコ磁石、ネオジム磁石など。ネオジムが最も強く、最高 1.4T。用途はさまざまで、磁気カードは永久磁石で情報を記録し、スピーカーは永久磁石とコイルで電気信号を音に変換。モーターにも永久磁石や電磁石が使われ、ハイブリット車のモーターにはネオジムなどのレアアース磁石が欠かせません。

モーター

スピーカー

教材用磁石

磁気カード

地磁気

都市環境磁場

宇宙磁場

環境に広がるさまざまな磁場

地球も、太陽も、銀河も、自然界にあるものはさまざまな磁場を発生しています。また、人 1 物も磁場を発生し、私たちの生活空間は、いろいろなものが発生する磁場におおわれています。この宇宙で最強の磁場を発生しているのは中性子星で、約 1 億 Tです。

10-15T以下 磁場の極限を追う

光ポンピング原子磁気センサー
最も弱い磁場を測ることができる方法です。

光ポンピング 10^{-15}T以下

10-4T以上 SQUID 超伝導センサー

地磁気 10^{-4}～10^{-5}T

地磁気 3×10^{-5}～6×10^{-5}T

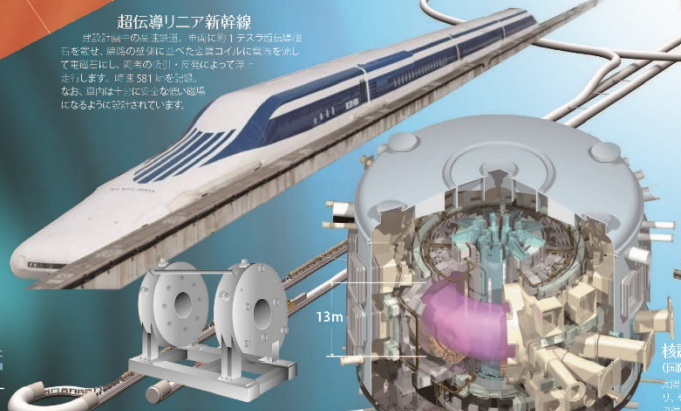
都市環境磁場 10^{-3}～10^{-4}T

宇宙磁場 10^{-7}～10^{-10}T

検出限界磁場

超伝導リニア新幹線

建設計画中の次世代新幹線。車両に取り付けた超伝導磁石を電気で励磁して強力な磁場をつくり、地上に並べた推進コイルに電流を流して電磁石にし、磁石の吸引・反発によって浮上・走行します。時速 581 kmを記録。
なお、国内は十分に安全な低い磁場になるように設計されています。



超伝導磁石が創りだす先端機器

超伝導体からできた線（超伝導線）をコイルにして電流を流すと、非常に強力な磁石になり、強い磁場を大きな空間につくれます。また、コイルの両端を超伝導線で結ぶと、電流が弱まることなく流れ続けます（永久電流）。そのため、電流をたくわえる装置にも、非常に安定した磁石にもなります。

24T以下 加速器

ほぼ光速まで粒子を加速する装置。物質や宇宙の起源を探る研究では巨大な加速器が運転され、粒子を加速するのに超伝導空洞が、粒子の軌道を曲げるのに超伝導磁石が使われます。

超伝導加速空洞を走る粒子ビーム

計画されている線形加速器

磁気共鳴診断装置(MRI)

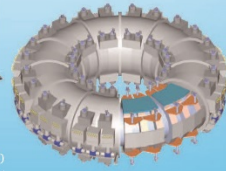
体の内部などの様子を調べることができる装置。主に医療用に用いられています。一般的には 1 ～ 1.5 T 程度です。

核磁気共鳴(NMR)

物質の構造や状態を調べる装置で、タンパク質の構造などを明らかにします。最強の装置では 23.5T を発生。(写真は 21.8T の装置)

超伝導磁気エネルギー貯蔵装置(SMES)

超伝導磁石に永久電流を生じさせて、電気を貯める装置。工場の安定な電力供給や、ミクロエネルギーを有効活用するための装置などの応用が考えられています。



核融合

(国際熱核融合実験炉 ITER)
太陽のように核融合で熱をつくり、それで発電を行う計画。超伝導磁石によって、1 億度の高温プラズマ（陽イオンと電子に分かれた気体）を閉じ込めます。5 階建てビルの高さの巨大な磁石を含み、13T の磁一が計画されています。

13m

10-14T以上 わずかな磁場をとらえるSQUID磁気センサー

SQUID（超伝導量子干渉素子）は高感度の磁気センサーで、磁場を磁束量子の単位で測れます。磁束量子は磁束の最小単位で、2×10^{-15} Wb［ウェーバー：T/m²］です。脳や心臓などは、非常に弱い磁場を出していますが、このセンサーを用いれば、異常の有無や、それが生じている場所などを知ることができます。

脳磁計測

心磁図

シリコン単結晶引き上げ装置

99.9999999% 以上の高純度の大型シリコン単結晶は、シリコン結晶の対称を抑えるために超伝導磁石にかこまれた空間で育てられます。

一家に 1 枚 磁場と超伝導 MAGNETIC FIELD & SUPERCONDUCTIVITY

製作・著作 文部科学省

企画・監修 (社)低温工学協会 [2011 年 4 月より (社)低温工学・超電導学会に改称予定]

制作協力 下山淳一（東京大学）、石山敦士（早稲田大学）、冠澤健則（物質・材料研究機構）、須路 智（東北大学）、廿日出好（豊橋科技大）

写真・図版提供 物質・材料研究機構、櫻田晋二（岡山大学）、柿木隆介（自然科学研究機構）、ITER 機構、東海旅客鉄道（株）、中部電力（株）、(株)日立メディコ、(株)東芝、Rey.Hori、ユニフォトプレス

編集・デザイン (有)サイテック・コミュニケーションズ 高田文世 星田 誠

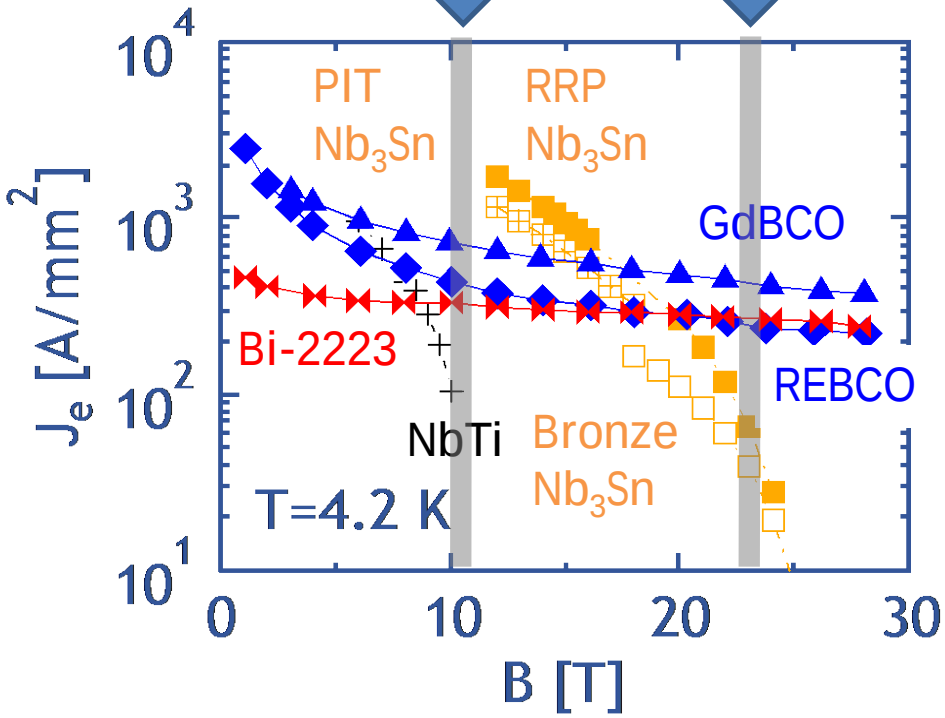
科学技術週間 http://stw.mext.go.jp/

1976年
NIMS 太刀川ら
Nb3Sn実用化
NbTiの壁を突破
12T～23Tが実現

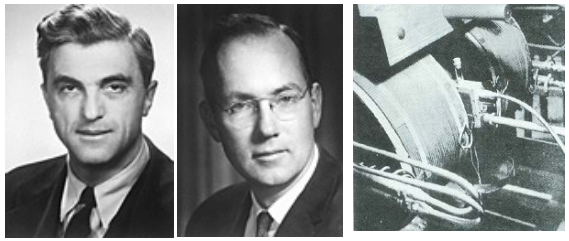
1987年
NIMS 前田ら
Bi系HTS発見
24T（1000MHz）の壁を突破
24T以上（超1GHz）が可能に

12T（500MHz）の壁

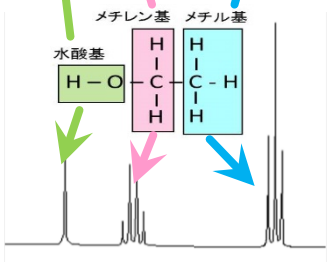
24T（超1GHz）の壁



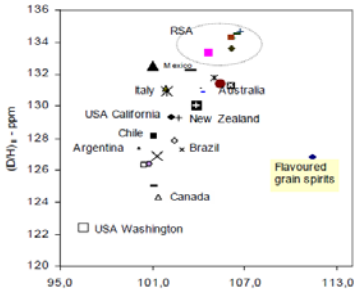
① 1945年 NMR発明　磁場は1T電磁石



② 化学シフトは1T電磁石で発見



④ 超伝導磁石で感度と分解能が飛躍的に向上。ワインの産地特定検査法など有機物の分子構造



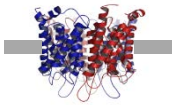
③ 1962年
超伝導ジャンプ
5T～10TがNbTiで実現

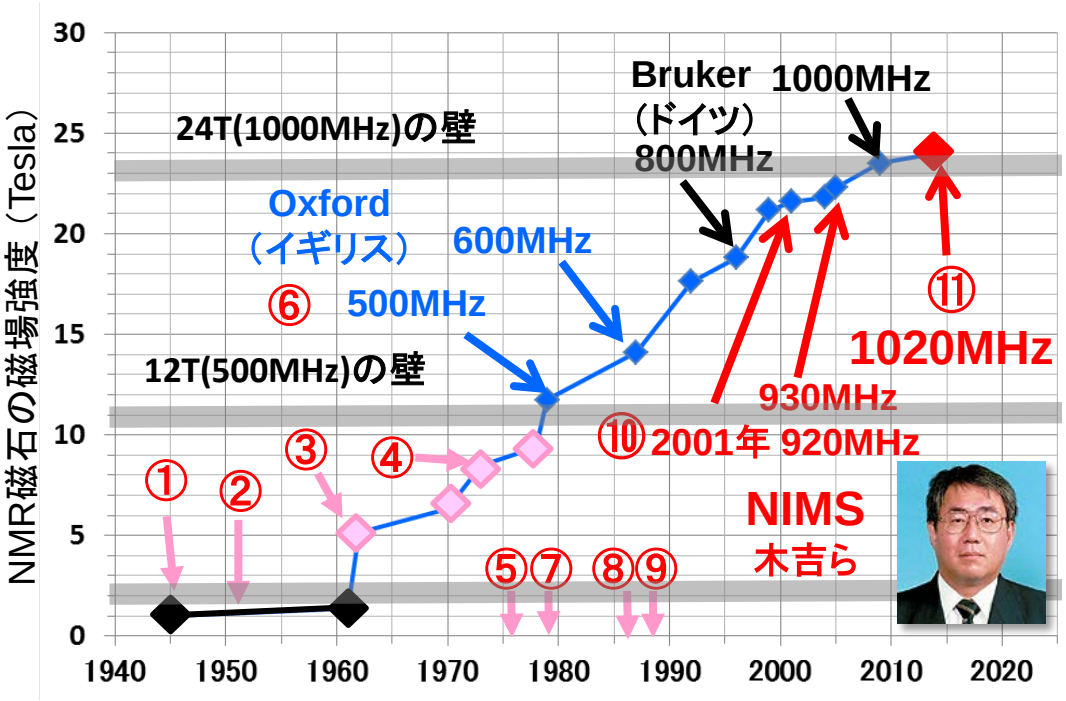
・超伝導接続
・極細多芯構造
・ツイスト構造

⑤ 1976年
Nb3Sn実用化
NbTiの壁を突破
10T～23Tが実現

NIMS 太刀川ら
世界最高磁場

⑩ 900MHz(21T)以上で
タンパク質など高分子

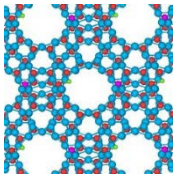


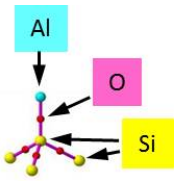


⑧ 1987年
Bi系HTS発見
NIMS 前田ら

⑪ 2014年
1020MHz(24T)
Bi系HTS実用化
Nb3Snの壁を突破
24T以上はHTS

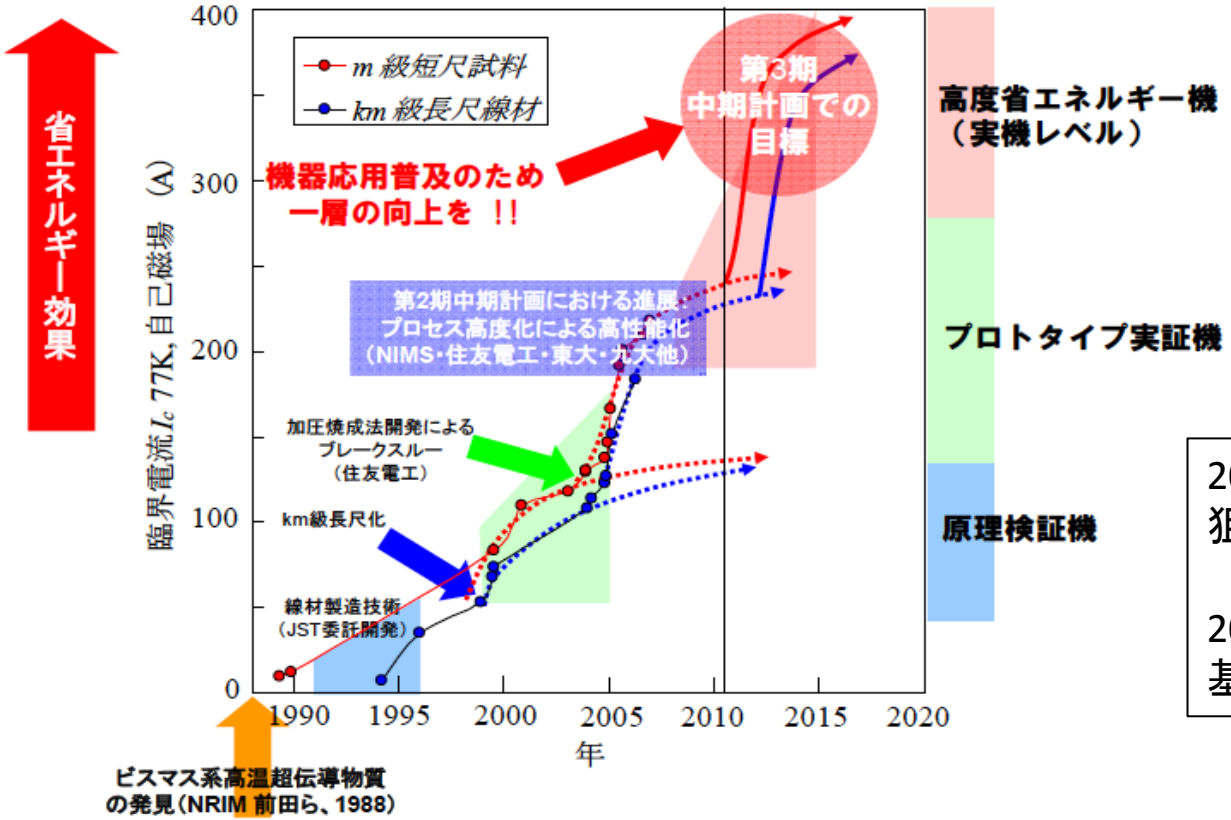
⑥ ゼオライトやLi電池など固体材料
非晶質、不均一系、隣接原子番号





MRI ⑦1979年1T（内蔵）～⑨1988年3T（脳）

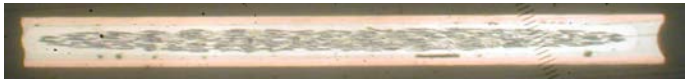
成功の要因　日本のBi系超伝導線材の技術は世界一



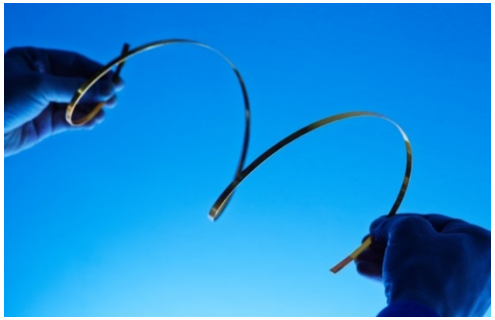
2006年の時点で超1GHzが
狙える状態になった。

2008年から改造開始。
基本設計は1996年の計画通り

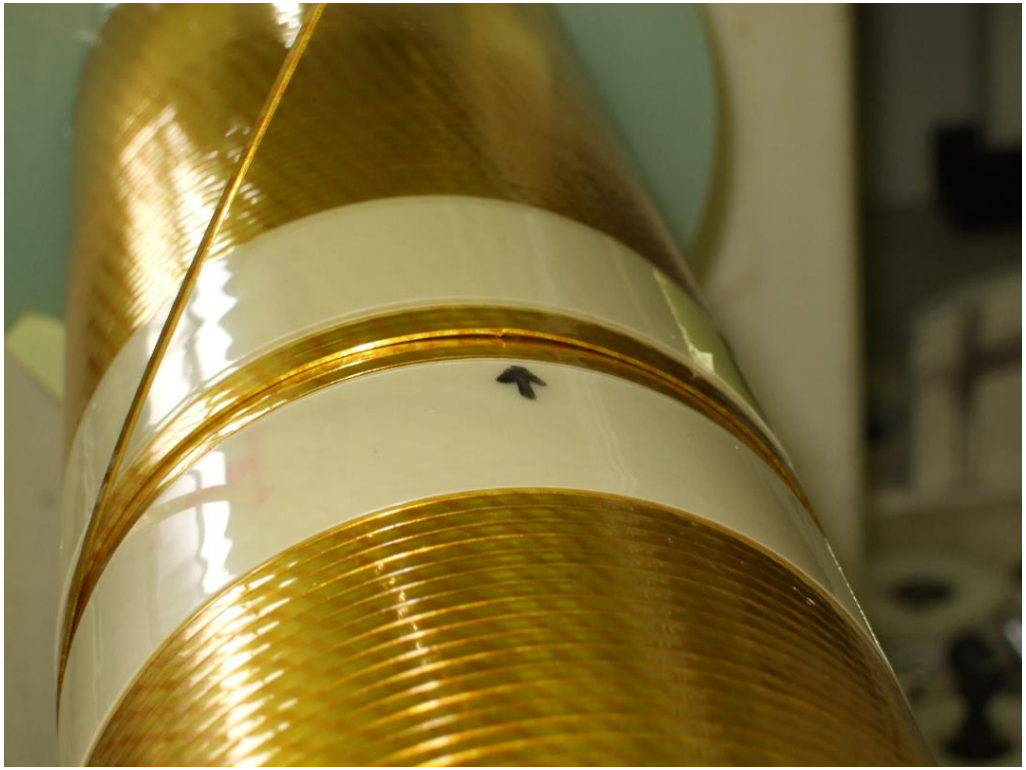
前田(故人)
NIMS

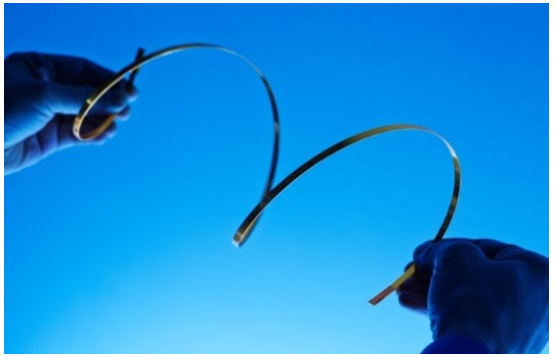


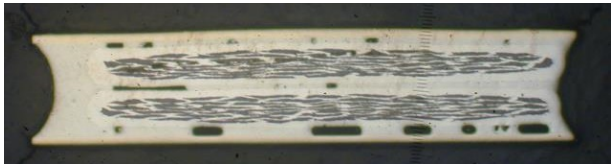
住友電工のBi2223テープ線材



巻線技術の開発（神戸製鋼）





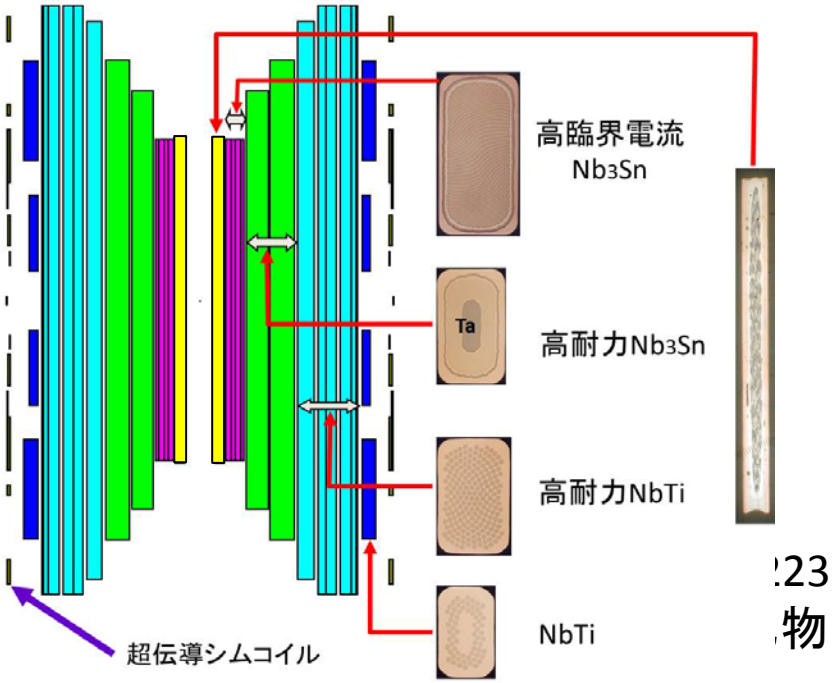


1020MHz-NMR磁石の構成 （920MHz磁石を改造）

従来の壁（1000MHz）を超えるため
高温超伝導線材を使った世界初のNMR磁石

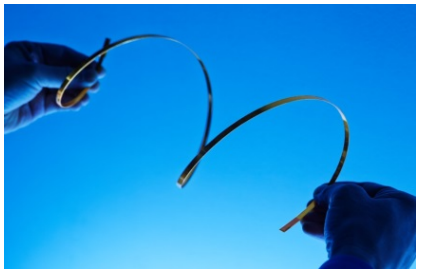
2008年から
改造開始

2010年に組立完了
2011年大震災被災
2014年磁場成功
2015年NMR成功

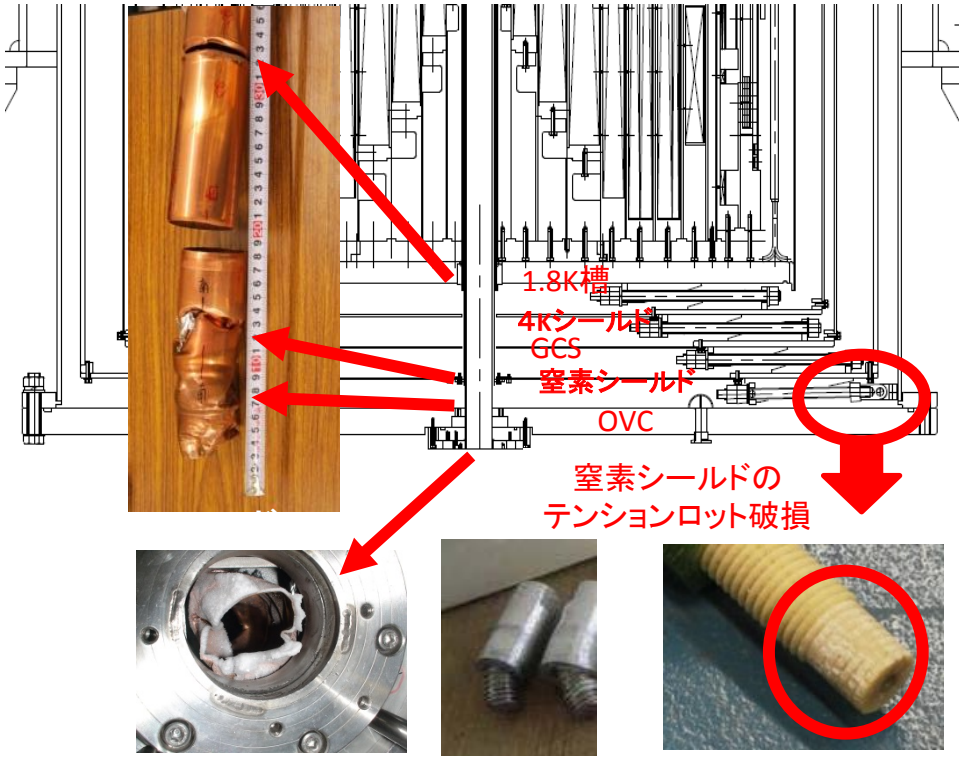


920MHz-NMR磁石
2001～2006年まで
主に理研がタンパク質の
構造研究などに共同利用

銅合金で補強



組立完了直後に被災したNMR磁石と復旧工事



2011年3月11日の東日本大震災
により多くの重要箇所が破壊された

修理中のNMR磁石
修理期間 2011年5月～2013年3月

安全性向上の開発

マグネット電源
（MPS）

直流遮断器

4Ω
抵抗

エネルギー吸収回路

短絡回路
（MPS異常時）

270 A
0.97 V

超1GHz NMR
磁石

コイル

3φ 200 V 11.5 A
15 sec

瞬低補償装置
（バッテリー）

チラー
（MPS用）

シム
電源

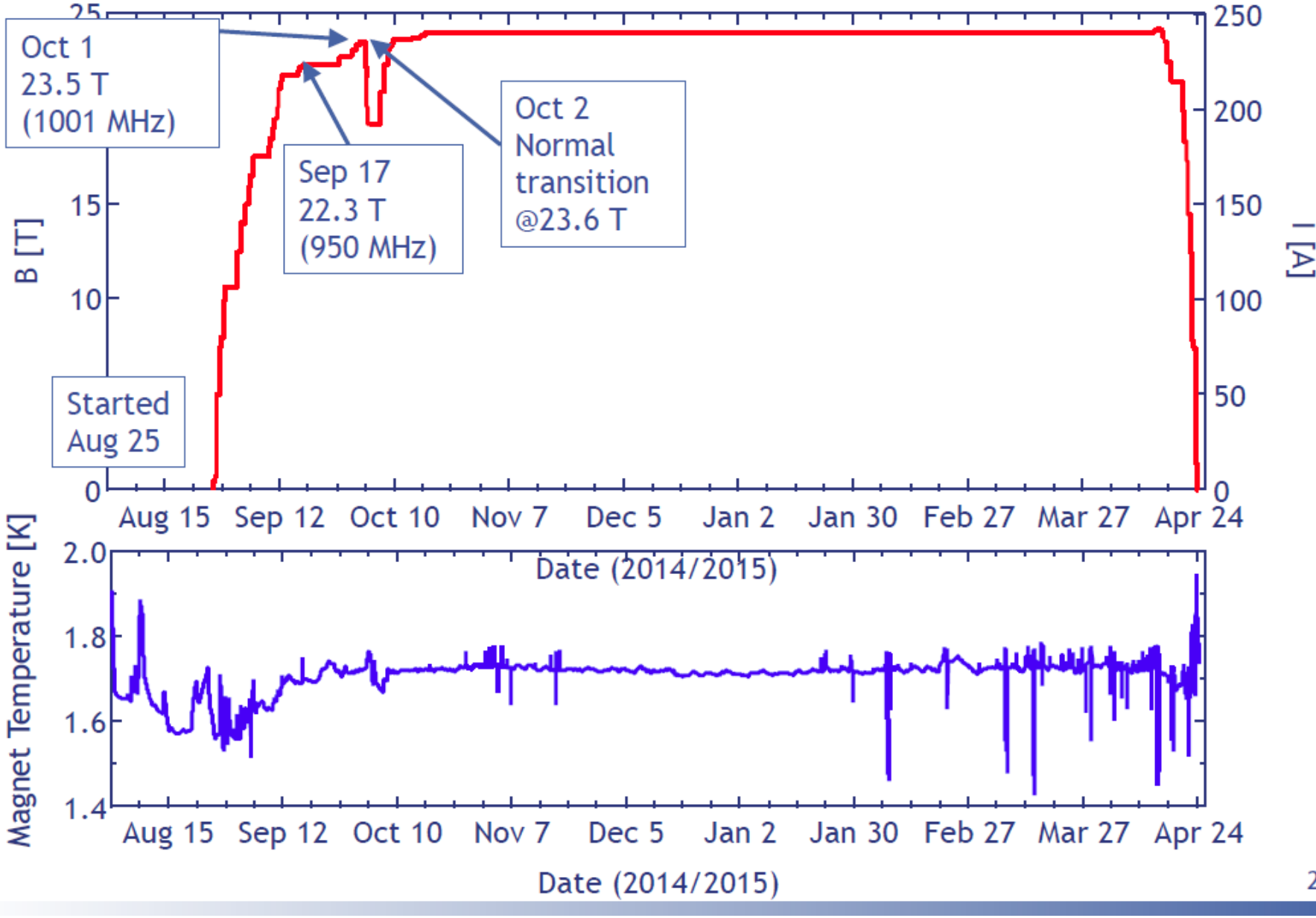
60 kVA

非常用電源
（発電機）

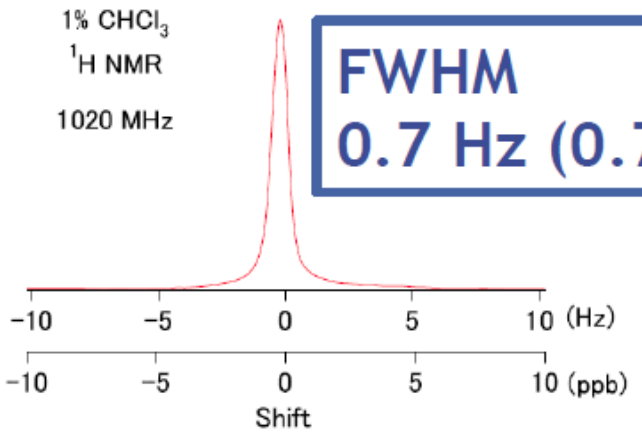
商用電源

M.Takahashi, et.al., 2015. PAT

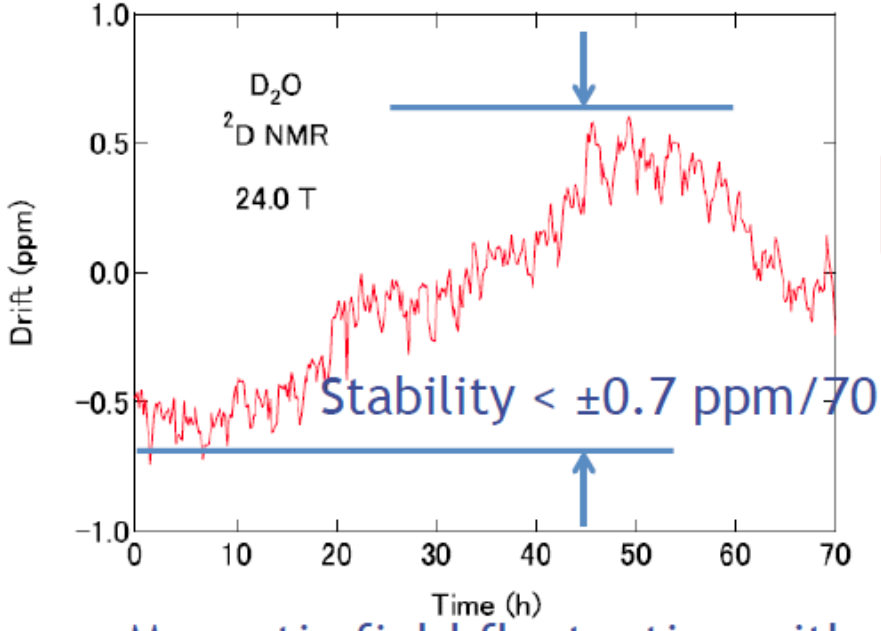
Charging up and operation



Stability and resolution for solution NMR

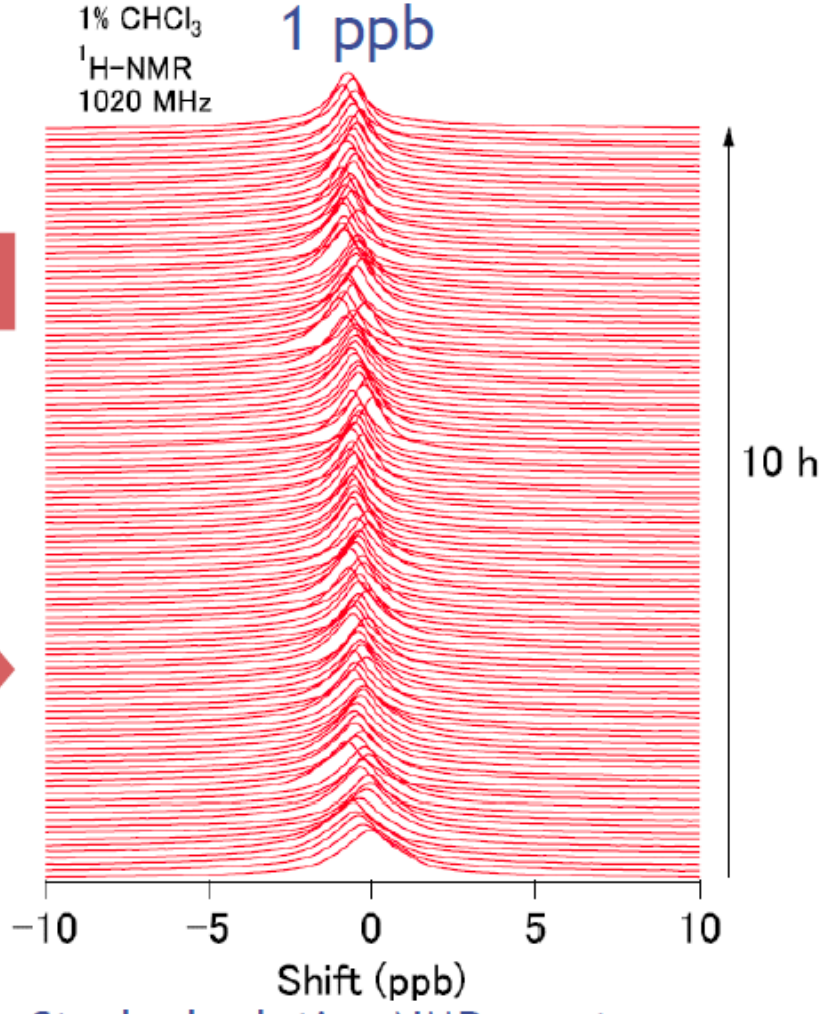


FWHM
0.7 Hz (0.7 ppb)



Stability < ±0.7 ppm/70 h

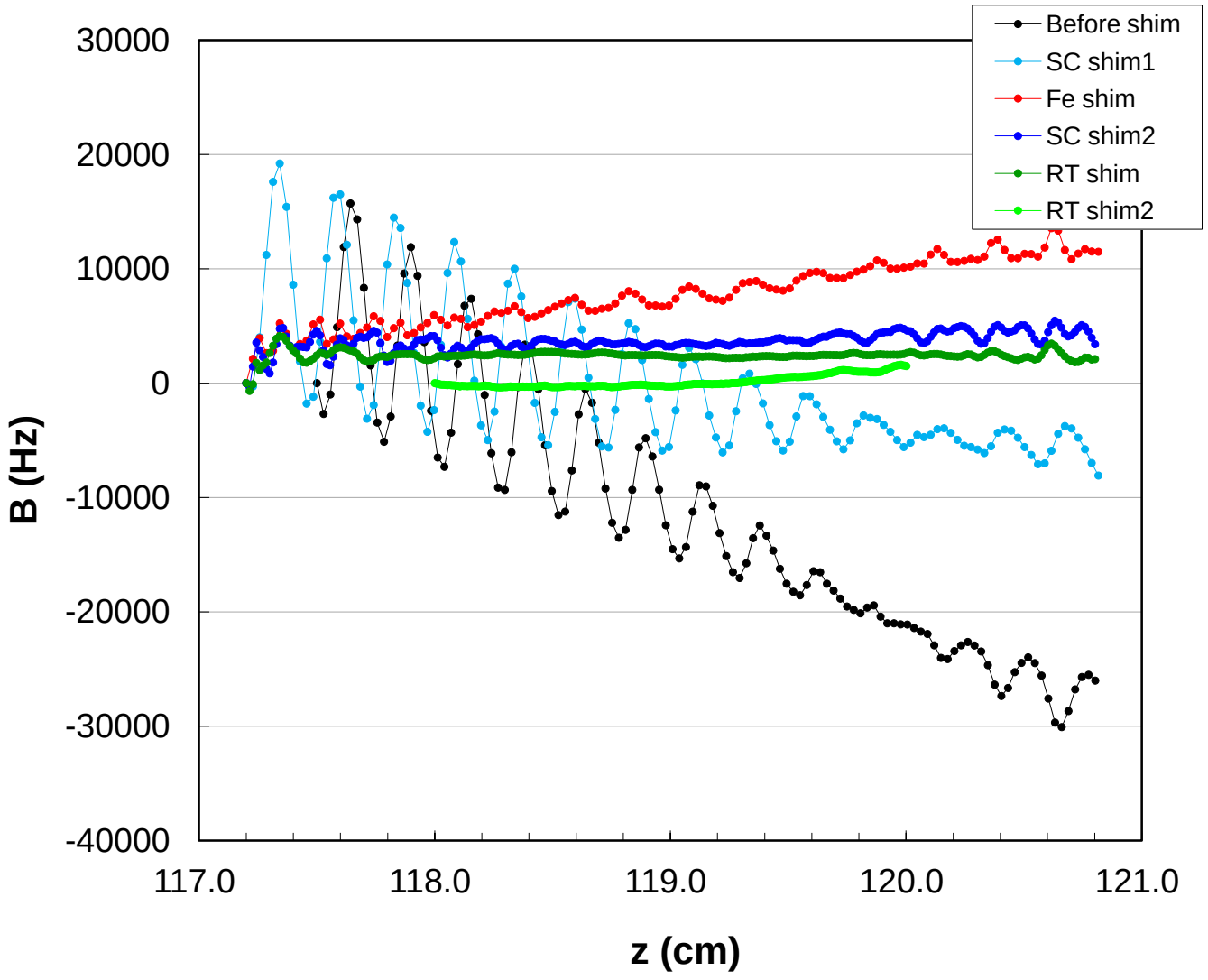
Magnetic field fluctuation without lock operation



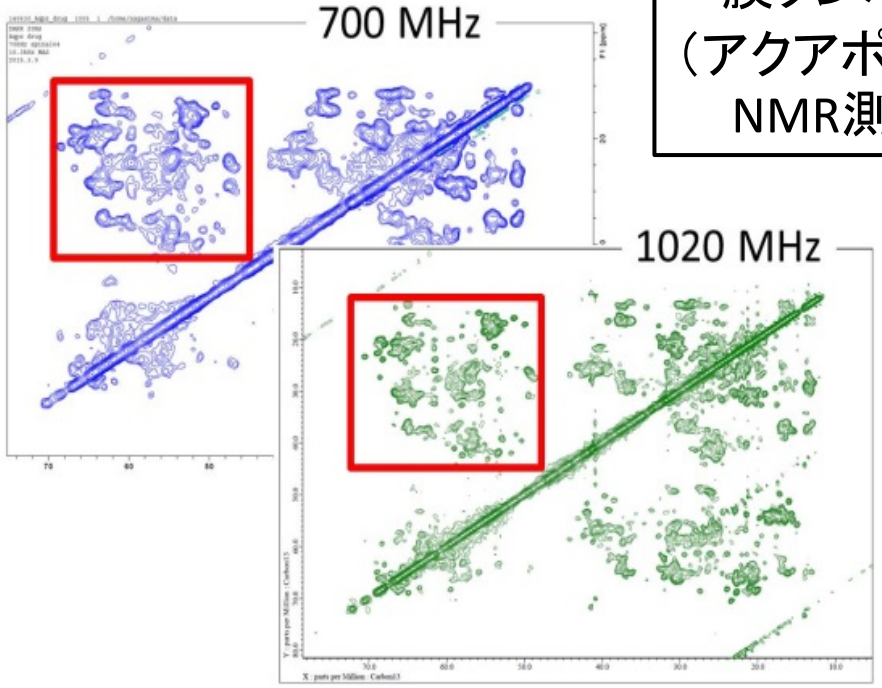
Stacked solution NMR spectra under ^{2}H internal lock operation

K. Hashi et al., JMR, 256 (2015) 30

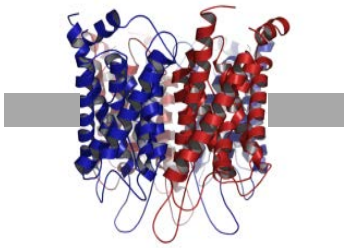
Shimming Magnetic Field Homegeniety

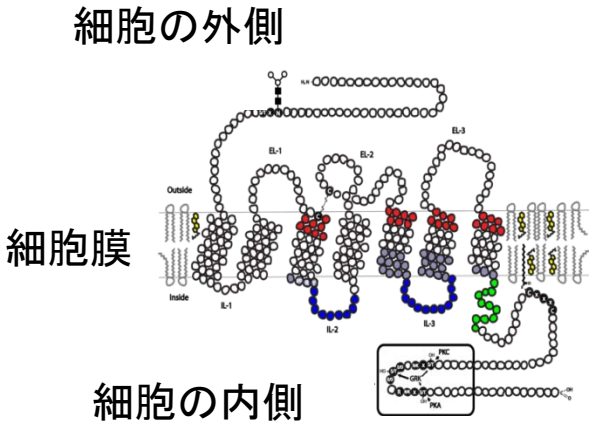


超高磁場NMRにより、創薬で最重要な膜タンパク質である GPCR（Gタンパク質共役受容体）を数週間で解析可能になります



膜タンパク質（アクアポリン）のNMR測定例





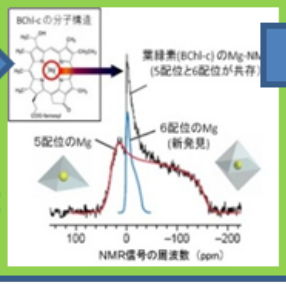
GPCRの種類	拮抗薬・作動薬の薬理作用と代表的薬物
アンギオテンシン受容体	高血圧症治療薬（バルサルタン、ロサルタンなど）
セロトニン受容体	抗精神疾患（クロザピンなど）
ドーパミン受容体	制吐薬、抗精神疾患（クロルプロマジンなど）
ヒスタミン受容体	消化性潰瘍治療薬、抗アレルギー薬 （シメチジンなど）
オピオイド受容体	鎮痛薬 （モルヒネなど）

- 膜タンパク質を介して物質や情報が伝達され生理変化が起こる。
- **50%以上の医薬品**は膜タンパク質を標的として開発されている。

NMRへの期待　強磁場固体NMRだけが解明できる重要課題と将来展望

30年以上の謎

葉緑素の
超分子構造問題
超分子が発電機能
を持っている



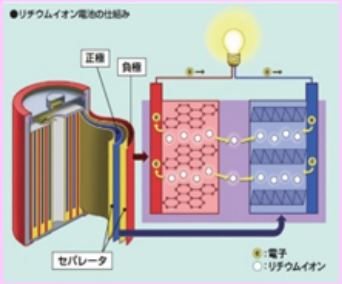
NMRで解明

超分子構造
を世界で初め
て解明

将来展望

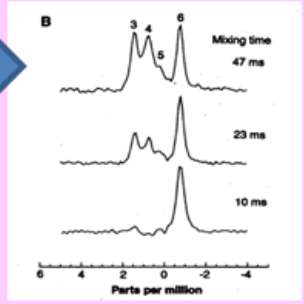
葉緑素
を用いた
太陽電池

■ リチウム電池はガラス状物質のため、高性能化開発に強磁場固体NMRの貢献が期待されている
■ トヨタ、ホンダ、日産、旭化成、NEC、パナソニック等と共同研究



NMRで構造解明

リチウム電池は
ガラス状物質
リチウムだけを
選択的に直接観測



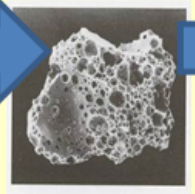
将来展望

リチウム電池
の高性能化

■ 鉄鋼スラグの局所構造を解明した。スラグ再資源化、放射性廃棄物ガラス固化体の開発等（新日鉄との共研）

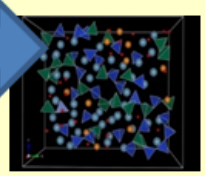
廃棄物

溶鉱炉から
出るスラグ
（ガラス 構造）



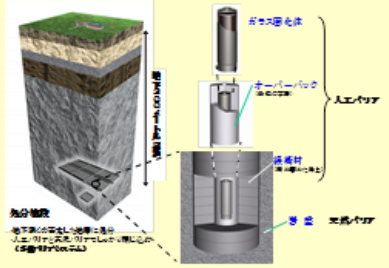
NMRで解明

ガラス構造
解明に成功



将来展望

放射性廃棄物を
封入するための
ガラス固化体の開発



ま と め
強磁場NMRの展望

- ◆HTSの課題
  - ◆超伝導接続
  - ◆極細多芯構造
  - ◆ツイスト構造
  - ◆高度に安定・安全な電源システム
- ◆強磁場NMRの展開
  - ◆有機物限定から➔無機物へ
  - ◆特に、非晶質、不均一物質
  - ◆隣接原子番号の元素
  - ◆X線と補完的役割

ご静聴有り難うございました