

<震災特集>

東日本大震災について

About the Great East Japan Earthquake

超伝導科学技術研究会会長

下山 淳一

Forum of Superconductivity Science and Technology

President Jun-ichi Shimoyama

3月11日に発生しました我が国の観測史上最強の東北地方太平洋沖地震および繰り返された強い余震は、近代日本の歴史上、最も深刻な自然災害を招きました。また、原発事故による二次的な災害の影響も長期化を免れない状況に至っています。ここに、被災されました方々に心よりお見舞い申し上げます。

今回の大地震ではその直後より関東地方を中心に計画停電をはじめこれまでにない厳しい節電が求められました。そして、福島原発事故、浜岡原発の運転停止によってこの夏にはほぼ全国規模の電力不足が懸念されています。1973年に行われた石油ショックによる節電は中東からの石油輸入への不安に基づいたもので、その後、火力発電用の燃料の石油依存度を下げる対策がとられました。今回の電力不足は、その後の日本の電力供給体制を強く支えてきた原発による発電の急減によるものですから、それを補える分の他の方法による発電設備の拡充が必要になります。さらに、電力システム全体の将来構想についても、大幅な見直しが迫られています。超伝導技術は未来の電力システムにおける新戦力として期待されている一方、これまでの実績がほとんどないことから早期の導入にはやや慎重な扱いを受けざるを得ません。このような機において超伝導科学技術研究会は、まず超伝導技術の現状を広く適切に伝える役割を担い続けます。そして、やがて選ばれる技術となり、社会インフラに溶け込み、エネルギー・環境問題に対して超伝導応用が大きく貢献する時代をできるだけ早く創出すべく、超伝導技術の成長を促す活動を皆様のご理解とご協力を仰ぎながら一層積極的に進める所存でございます。既にご案内の通り、震災の影響で延期しました今年度の本会シンポジウムを6月24日に開催することになりました。午後部“グリーン・イノベーションと超伝導”での講演、討論は震災後の様々な情勢の変化も盛り込んだ内容となります。多くの皆様のご参加をお待ち申し上げます。

節電や自粛ムードなど、何かと縮みがちな折ではありますが、今年は超伝導100周年の記念すべき年です。これにふさわしい大発見や革新的な材料・機器開発など超伝導科学技術に関わる明るいニュースに期待しつつ本稿を結ぶことにいたします。

(1) 東京大学本郷キャンパスにおける

NMR 装置クエンチの事例紹介

Introduction of quench accident of NMR magnet occurred at Hongo campus of the University of Tokyo

東京大学大学院 工学系研究科

下山 淳一

School of Engineering, The University of Tokyo

J. Shimoyama

3月11日、14時50分頃に到達した大地震において、東京の震度は5強または5弱で、市域全体を見ても構造物そのものの被害は少なかった。なかでも本郷台地の上にある当キャンパスでの建物被害はほとんど無かったようである。もちろん、キャンパス内には高度成長期に建てられた脆弱な建物が数多くあるが、この10年くらいの間にそのほとんどに相次いで耐震補強工事が行われており、この効果もあったと思われる。但し、実際の震動の大きさは同じ建物でも階数や位置によってかなり異なった。今回の地震では2分以上強く揺れたこともあり、上層階では震度5で想定していたよりも多くのものが落下、破損し、また、かなり重い実験装置類も大きく位置を変えたりした。筆者の所属する研究室(5階)では当時、液体ヘリウム冷却の物性測定用超伝導磁石2台と、冷凍機伝導冷却式の大型室温ボアを持つ磁場配向実験用超伝導磁石を運転していたが、幸いにもこれらは本震や直後より繰り返された大きな余震に対しても全く異常なく稼働し続けた。

さて、以下には今回の地震によって起こった工学部5号館におけるNMR装置のクエンチを報告する。まず取材に協力いただいた藤田誠教授、佐藤宗太講師をはじめ藤田研究室の皆様にご感謝の意を表したい。この研究室は工学部5号館の4階に4台のNMR装置を有しており、内訳は600 MHzと300 MHzが各1台、500 MHzが2台で当日も全て運転されていた。このうちクエンチしたのは500 MHzの1台で、他の装置に異常は起きていない。地震発生時にこのNMR装置を使っていた大学院生の池本晃喜氏によれば、ちょうど測定を始めるところで揺れによってシムコイルの調整ができなくなり、NMR装置が大きく横揺れし始めたので実験室から出たとのことであった。図1は16時過ぎに撮影されたこの装置の様子である。装置上部が白くなって未だ安全弁から冷媒ガスが漏れていることがわかる。但し、この時点で磁場は保たれており超伝導磁石がクエンチしたわけではない。さらに時間が経過し20時40分頃になって本格的なクエンチが起こった。図2はその時の様子で、携帯装置で撮影された

動画も見せていただいたが、まさに普通のクエンチであった。このNMR装置は外層に液体窒素槽を持つタイプで、当時、液体窒素槽は80～90%、液体ヘリウム槽(容量69リットル)は75～80%満たされていたそうである。運転下限の液体ヘリウムの量は30～40%であり、冷媒が特に不足していたわけではない。



図1 3月11日、16時過ぎにおける500 MHz NMR装置の様子



図2 3月11日、20時40分頃に始まった500 MHz NMR装置のクエンチの様子

これらの事実から想像できるのは、最初に受けた強い震動の際に、液体ヘリウムの蒸発量が大きくなって内圧が上昇し、安全弁が開いて外部に漏れ始め、その後も液体ヘリウムの蒸発が続き、徐々に液面が低下し、運転下限レベル未満になった時に超伝導磁石がクエンチしたということである。まだ、修理が行われていないのであくまでも可能性であるが、この装置を製造し保守しているBruker社によれば、2つの冷媒槽の間の断熱部を支えていたグラスファイバーロッドが折れて液体ヘリウム槽が周囲と接触したのではないかと、という。ロッドの破損はクエンチした場合に多くみられる現象で、ロッドを太くすると頑丈にはなるが熱侵入が大きくなるため液体ヘリウムの充填頻度(この装置では2~3カ月に1回)が増してしまう、とのことであった。

以上より、この装置だけがクエンチにまで至った主因として、防振・免震の機構が他の装置を異なったことが考えられる。図3はこの装置の足元を撮影したものであ



図3 震災で落下したKEK電子陽電子リニアックの四極電磁石。ビームパイプ、真空マニフォールドも破断された

る。数cm程度の揺れであれば吸収できるような仕組みになっているようであるが、今回の地震のような大きな変位に対しては適応できず、装置に大きな震動の大部分が伝わってしまったと考えられる。ちなみに他のNMR装置はエアダンパー付きなど、より新しいタイプの防振・免震仕様となっている。

今回の事例は、小型のクライオスタットでも地震によって断熱不良が起こりやすく、かなり後になってクエンチが起こることを示したものである。地震の後に液体ヘリウム槽の残量およびその変化を注視していれば、いずれクエンチが起こることは予想できたと思われるが、一般のユーザーにヘリウム残量を確認する習慣を求めるのは難しい。各所に普及しているNMR装置は狭い部屋に設置されていることも多く、液体ヘリウムレベルの異常な低下を検知し、アラームが鳴るような機能が付けられるべきではないかと感じた。

(2) 産総研つくばセンターにおける超伝導研究現場での震災の影響

Impact of the earthquake disaster on superconductivity research activities in AIST Tsukuba center

(独)産業技術総合研究所

伊豫 彰

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

A. Iyo

2011年3月11日(金)の午後、実験室で測定の前準備をしていたところ、地震の初期微動(P波)による小刻みな振動を感じた。暫くして主要動(S波)による揺れが始まった。地震自体は珍しいことでは無いので、すぐに揺れは収まるだろうと高をくくっていたが、その日は違った。次第に揺れが激しくなり、測定装置は大きく揺さぶられ、

計測器や物品が棚から次々に落下するのが見えた。かつて経験したことのない激しい横揺れに中腰で耐えつつ、この地震はただ事では無いと感じた。

断続的に襲い来る大きな揺れの間をみて、建物から外に出た。高い建物が左右に揺さぶられ、道路の端を境目に地面が逆方向に動いているのが見えた。その日は、停電で信号が消えた道路を慎重に運転して帰宅した。茨城県つくば市での震度は、6弱～6強と発表されている。私が見た範囲では倒壊した建物は無かった。

産総研つくばセンターで、危険物質の漏洩などによる周辺地域への影響や人的被害が無かったのは不幸中の幸いであった。私には建物の損傷は一見無いように見えたため、装置さえ壊れていなければ、実験は早期に再開できるのではと期待した。ところが、被害の全容が明らかになるにつれ、地震の影響の重大さを認識させられた。特に、上下水道、研究排水/排気系、ガスラインなどの研究インフラが損傷を受けた。復旧作業により、4/20現在、一部の研究排水/排気系やガスラインを除いた研究インフラについては概ね復旧しつつある。

地震による被害は、同じ建物内でも場所や地震対策の有無によって大きく異なっていた。上の階ほど、揺れが増幅されたとし被害が大きかったようである。日頃から耐震対策が進められていたため、棚など倒れやすい物の多くは壁や床に固定されていた。また、本棚の上部には、本の落下防止ロープが取り付けられていた。これらの対策が、地震による被害の軽減に極めて有効であったと感じた。それらの対策が施されてなかったなら、人的被害が出たのではと想像される。一方で、耐震対策が施されていなかった一部の本棚からは、多くの本が落下し足の踏み場もなくなっていた(写真)。幸いにも、地震発生時そこに人はいなかったものの、もし棚の上部からの重量物の直撃を受けたなら、ただでは済まなかったであろう。

我々の研究グループでは、超伝導物質の合成を行っていることから、劇毒物を含む多数の試薬や有機溶剤などを所有している。地震直後、真っ先に心配したのは、それらの容器の破損とそれに伴う火災や劇毒物の漏洩である。幸運にも試料合成室が比較的揺れが小さかった一階に有ったこともあり、試薬瓶などの破損は無かった。ほとんどの試薬が専用の棚に保管されていたことが、事故防止に有効だった。普段からの試薬管理の重要性を改めて認識させられた。

我々の研究室の実験装置について、まだ通電していない装置もあるのではっきりしたことは言えないが、多くの装置について外観上の損傷はほとんど無いことから問題は少ないと見ている。一方で、修理に数ヶ月を要す

る物性測定装置があることも把握している。地震とは別に、福島第一原子力発電所の事故による電力不足の影響も深刻である。一刻も早く実験を再開したいのは山々であるが、節電の要請もあり、実験開始時期や実験内容を検討している状況である。

産総研つくばセンターの他の超伝導関連研究グループに話を聞いたところ、実験装置への震災の影響はそれ程深刻ではないということであった。研究インフラの復旧後、速やかに実験再開できるように準備を進めているとのことである。むしろ、電力不足の影響の方が大きいというのが研究者の共通認識である。超伝導の研究には、冷凍機など多大な電力を消費する装置があり、それらの装置無くして研究はおぼつかない。電力使用量が制限されたり、ましてや計画停電が実施されたりした場合、単結晶育成など長時間の運転が不可欠な実験はできなくなる。その場合、研究の中断や内容の大幅な変更を余儀なくされることになる。産総研では、実験装置ごと電力不足のない地域に移動して、研究を行うことを検討している人もいる。

未曾有の大震災により、東北地方を中心に東日本は大規模な被害を受けた。これが日本の経済活動にも暗い影を落としている。復旧には多大な時間と労力と資金が必要なのは明白である。大震災からの復興に超伝導技術は貢献できるであろうか、超伝導に関わる研究者としてどのように振る舞えばよいのか、実験ができないこの時期にじっくり考えてみたいと思う。最後に、国内外の超伝導研究者から震災の安否確認や励ましのメールや電話を頂いたことに対して感謝したい。大変嬉しかったし、人と人の繋がりの有り難みを感じることができた。



(写真) 地震直後の居室の様子。棚から落下した本などが通路を埋め尽くしている。

(3) 東日本大震災による KEK 加速器の 被害状況

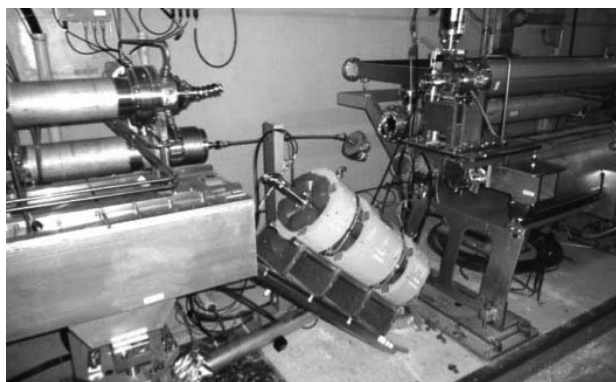
Damages on the KEK Accelerators by the Great East Japan Earthquake

高エネルギー加速器研究機構
生出 勝宣
High Energy Accelerator Research Organization
K. Oide

まず、今回の東日本大震災において、高エネルギー加速器研究機構のつくば・東海両キャンパスとも、職員・関係企業・共同利用来訪者を含め、人的被害はなかった。3月11日はすべての加速器は朝から停止しており、地震発生時刻においては加速器トンネル内で作業を行っていたところもあったが、全員無事に避難することができた。

機構の建家・トンネルも、いくつかの損傷は出たが、崩壊に至るような致命的な被害は免れている。加速器本体についても、以下に述べるような損傷はあるものの、総じて限定的なものであり、諸条件が許せば早期の運転再開が可能な程度である。ただし、多くの装置は実際に本格的な通電をし、ビーム運転を開始してみないと最終的な損害状況は判定できないので、なお予断を許さない。

まず、つくば地区の加速器では、電子陽電子線形加速器(リニアック、全長600 m)の損害が最大であった。もともとこの加速器の架台は免震構造をもち、一定の振幅内では比較的自由的な振動を許すものであったが、今回は一部区間では想定振幅を超えたため、搭載されていた収束電磁石が落下した(写真)。



(写真) 震災で落下したKEK電子陽電子リニアックの四極電磁石。ビームパイプ、真空マニフォールドも破断された。

また、加速感同士を接続する真空ベローズも多数変形・破断し、リニアック全長にわたり、大気暴露されてし

まった。それによる加速管(無酸素銅製)の高電界性能の劣化が懸念されたが、今までのところ交換を要するほどの障害は現れていない。リニアックにおいては、被災直後から職員・関係企業の迅速な対応と復旧作業の結果、5月10日には放射光リング(PF/PF-AR)用のビーム調整運転が再開される見込みである。ちなみに、J-PARCのリニアックでも免震構造の部分でセラミック管やベローズの破損が発生しているが、他の「剛構造」の加速器ではそのような損傷は軽微のため、架台構造の耐震性についてはさらなる検証が必要である。

Bファクトリーリング(周長3 km)では、高周波発生装置(クライストロン)の放射冷却装置架台の破損、高周波制御側室のフリーアクセス床の落下、一時保管電磁石の相互衝突による破損などが発生した。また、トンネル内の電磁石も、現在改造建設中の「スーパーKEKB」にとっては数十マイクロンの移動も気になるため、再度の精密設置作業が必要になった。

2つの放射光リングでは高周波加速装置の一部に転倒や位置ずれがあったものの、概ね健全であり、PFリングでは5月中の運転再開が見込まれる。また、超伝導試験加速器(STF)とエネルギー回収型リニアック(コンパクトERL)についても大きな損傷は見られない。試験加速器(ATF)においてはケーブル棚の崩落や一部ベローズの変形などが見られる。

なお、すべてのヘリウム冷凍機については、運転停止中だったこともあり、大きな被害は見つかっていない。

東海地区ではKEKが担当するMRシンクロトロン(周長1,570 m)加速器本体については、一部の軽い真空漏れを除いて大きな損傷は外観上は見られない。トンネル壁面のひび割れによる漏水は30ヶ所以上で発生したが、すでに対応済みである。また、加速器トンネルと副トンネルの接合部に数cm以上の段差が発生しているが、接合ゴムの亀裂には至っていない。上流のリニアック(全長250 m)とRCSシンクロトロン(周長350 m)についても、上記のリニアック真空漏れを除いて、少なくとも加速器本体の外観上の被害は少ない。ただし、受電、水、空調、道路などは一定の損害を受けている。

(4) 東北大学における超伝導関連機器への 東日本大震災の被害状況 Damages of Great East Japan Earthquake on Superconducting Related Devices at Tohoku University

東北大学 金属材料研究所
淡路 智
Institute for Materials Research, Tohoku University
S. Awaji

2011年3月11日14時46分頃、大きな揺れが東北地方を中心とした広い地域を襲った。東北地方太平洋沖地震である。最初、比較的小さい揺れから始まり、徐々にゆっくりとした横揺れが大きくなり、1-2分後から立っていられないほどの大きな揺れへと変化した。強磁場センター3階の居室では、棚の本が次々と落下し、停電となり、地震としては非常に長い時間が経過した後やっと収まった。途中、床や天井が崩れるかと本気で思ったほどである。揺れていた時間は東大地震研の発表では6分程度となっている。地震の規模はマグニチュード9.0、震源地は三陸沖、東北大学のある仙台市青葉区の震度は6弱と発表されている。

しかし揺れの影響は、場所や階層、耐震強度などによって大きく異なっており、金研のある東北大学片平キャンパスは、比較的被害が小さかった。一方で、青葉山キャンパスは被害が大きく、倒壊の危険性が高いため立ち入り禁止となっている建物が少なくとも3棟以上あった。

片平キャンパスにある強磁場センターには、2台のハイブリッドマグネット、3台の液体ヘリウム冷却の超伝導マグネット、8台の無冷媒超伝導マグネットが常時稼働している。しかし、これらの中で地震の時に磁場発生中であったマグネットは、無冷媒マグネット2台だけで、それ以外は冷却されていたが磁場発生をしていなかった。

一般的に超伝導マグネットは、背が高いため転倒の危険性がある。しかし、強磁場センターにある3台の超伝導マグネットは、深さ1.5 mほどのピット内に設置され、マグネットデューワーの上部はデューワーサイズの穴を開けた蓋により固定されているため、転倒などは起きなかった。磁場発生も行っていなかったため、クエンチも起きなかった。その後、1台の正常動作が確認され、残りの2台も特に問題は無いと予想される。

2台の励磁中の無冷媒超伝導マグネットは、停電に伴う冷凍機やマグネット電源の停止によりクエンチした。しかし、液体ヘリウムを用いていないので、クエンチ後はマグネットの温度上昇が起こるだけで、見た目の変化は

ない。そのまま長期間停電が続いたため、無冷媒を含むすべての超伝導マグネットは、一旦室温に戻った。その後の冷却・テストの結果、一部の冷凍機に軽微な故障があったが、強磁場センターのすべての無冷媒超伝導マグネットで、地震前の性能を確認した。

一方で、ハイブリッドマグネット用のヘリウム液化機、水冷マグネット用8 MW電源、6 MWターボ冷凍機(冷却水用)などは、地震後不具合が生じ更新が必要な状況となっている。

このように、東北大金研に於いては、超伝導関連機器の地震による影響は非常に小さかった。5月中にはすべてのマグネットの動作チェックを終了し、6月より一般共同利用を開始する予定である。

一方で、地震の影響あった事例を調べると、同じ片平キャンパスにある極低温科学センター(片平地区センター)では、液化機付属の貯槽から250 l液体ヘリウムベッセルへの注液作業中に地震が起き、ベッセルが地震で傾いた。これに伴い、ベッセルに刺さっていたトランスファータブが曲がり、抜けなくなった。その後チューブの曲がり修正して抜いたあと、液体ヘリウムの空気開放を行って放置して事なきを得た。このベッセルは買ったばかりだったが、内槽をぶら下げているネックが曲がったため廃棄処分とした。

比較的被害の大きかった青葉山キャンパスの理学部化学科では、8台ほどのNMR装置があるが、そのうちの400 MHz-NMR装置が転倒した。このとき、クエンチにより大量のヘリウムが吹き出したらしいが、破裂などの大事には至っていない。これ以外にも、東北大学では多くのNMR装置が稼働しているが、上記の転倒した装置以外は、磁場を出したままの状態を維持できていたようである。

超伝導マグネットを用いた物理現象評価システム(PPMS)も東北大には数多く導入されている。そのうち工学部にあるPPMSの1台が転倒したとの報告がある。この場合も、励磁中では無かったため、クエンチは起きていないが、転倒により大量のヘリウムが蒸発したようである。この装置に関しては、これから冷却・テストを行うと聞いている。

青葉山キャンパスにある極低温科学センター(青葉山地区センター)では、液化機に付属する2000 l貯槽内の断熱が破れると言う事態になった。この時、貯まっていた液体ヘリウムが安全弁から一気に吹き出したが、破裂には至っていないとのことである。

上記のような、東北大学におけるヘリウム液化システム関連のトラブルにより、液体ヘリウムの供給は9月末までは通常の7割となることが、片平地区センターで発表されている。このため、液体ヘリウムを用いる装置の利用

も、秋口までは制限を受けることとなる。

地震の被害状況から、地震に対する超伝導関連機器における地震対策として考慮すべき点を考えると、①転倒防止をしっかりとしておくこと、②閉塞しないよう逆止弁などの対策をしておくこと、の2点ではなかろうか。

特に基本的に永久電流で用いるNMRやMRIなどの装置では、地震で転倒しなければほとんどが、そのままの状態を維持できるように思える。強磁場超伝導マグネットでさえ、クエンチ点近傍での運転でなければ、多くの場合は停電してもクエンチせずに永久電流モードに勝手に入るか、長時間の磁場減衰に入るため、やはり安全に停止させることができる。再凝縮装置が付いている場合に長時間停電した場合でも、その際のケアを事前に考えておけば、大地震の際にも装置は維持できると考えられる。低温装置の扱いに慣れていない部署の場合には、上に加えて、停電時の寒剤補給方法、強制クエンチ法などのマニュアルを整備し、対応できる専門家の連絡先(業者の他、低温センターなどの低温機器を取り扱っている研究室など)を、確認しておくことが重要と感じた。

以上、東北大学における東日本大震災の影響について簡単にまとめ、示唆される地震対策について考えてみた。今回の地震の影響については、必ずしもすべてをカバーできていない点があることを御容赦願いたい。現在、低温工学・超伝導学会では、地震の影響を詳細にまとめる動きがあり、客観的な情報はそちらで明らかとなろう。最後に本記事を執筆するにあたって貴重な情報を頂きました、極低温科学センターの野島勉先生、中村慎太郎先生、工学研究科の小池洋二先生、足立匡先生、理学研究科の落合明先生、山下修治先生に感謝致します。

<会議報告>

未踏科学技術協会超伝導科学技術研究会

第77回ワークショップ

「極限を測る超伝導技術の最前線」

Report on the FSST 77th workshop “Cutting-edge of superconductive sensing technology”

(財)国際超伝導産業技術研究センター

日高 睦夫

International Superconductivity Technology Center

M. Hidaka

2011年3月10日東京大学武田ホールにおいて「極限を測る超伝導技術の最前線」というテーマで未踏科学技術協会超伝導科学技術研究会の第77回ワークショップが開催された。一日遅ければ大震災に遭遇することになっていたが、この日はそんな未来も知らず超伝導計測技術のエキサイティングな話を堪能することができた。超伝導体だけが持つ特異な性質は、計測技術との相性が良い。極低温への冷却というコストを払っても余りある性能が得られること、その性能を使って様々な興味深い応用が行われていることが、聴衆に浸透したワークショップであったと思われる。

産総研の前澤氏が最初の講演で紹介したように、超伝導体を用いた検出器には、SQUID、TES、STJ、SISミキサなど多くの種類がある。被測定信号によって何らかの超伝導状態を変えることによって測定が行われる。被測定信号は磁場、様々な波長の電磁波、粒子など幅広い。また、これらの応用も電気標準、医療、材料分析、量子通信、宇宙観測、大気観測など多岐にわたっている。

産総研金子氏の講演では、量子電気標準を構築するために超伝導デバイスが不可欠であることが述べられた。ジョセフソン効果を用いた直流電圧標準がすでに国家標準として用いられている。超伝導体は巨視的量子効果により、比較的大きなサイズのデバイスで安定した量子効果が得られる。配線で抵抗が発生しないことも標準にとって超伝導を使用することの大きな利点である。現在は、交流電圧標準、電流標準などに向けた研究が進められている。

金沢工大上原教授はニオブ系SQUIDを用いた医療応用を紹介した。SQUID脳磁計は我が国でもすでに数十台医療現場で使用されており、個々人の脳の機能部位を特定することにより、脳手術により削除する範囲が