

EARTH MAGNETIC FIELD AND DEMAGNETIZATION OF STEEL STRUCTURE IN THE XFEL ACCELERATOR TUNNEL

Sakuo Matsui^{A)}, Hirohumi Hanaki^{B)}, Shinsuke Suzuki^{B)}, Takahiro Inagaki^{A)}, Hideki Takebe^{A)}, Yasuyuki Tajiri^{C)}, Keita Yamazaki^{D)}, Shigetaka Hirotsato^{D)}, Masafumi Yamashita^{C)}, Yusuke Maeda^{C)}, Yoshifumi Tsukamoto^{C)}, Takashi Otsuka^{A)}, Noritaka Kumagai^{A)}

^{A)} RIKEN, 1-1-1, Kouto, Sayo, Sayo, Hyogo, 679-5148

^{B)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute, 1-1-1, Kouto, Sayo, Sayo, Hyogo, 679-5198

^{C)} SPring-8 Service Co., Ltd, 2-23-1, Kouto, kamigori, Ako, Hyogo, 678-1205

^{D)} TAKENAKA Corporation, 1-5-1, Ohtsuka, Inzai, Chiba, 270-1395

Abstract

The earth magnetic field was measured in the XFEL accelerator tunnel with a fluxgate magnetometer. The variation of vertical field was from -0.1G to 0.4G against the 4m length. This change was too large to cancel at the injection section especially around an electron gun. Thus the magnetization of iron reinforcing rod was demagnetized using a degaussing system consisted of a high voltage supply, a condenser of large capacity and a coil. The variation of vertical magnetic field was smoothed within 0.1G . The iron reinforcing rod is easy to be magnetized because the strong electromagnet is usually used as the lifting and carrying.

XFEL 加速器トンネル内の地球磁場と鉄筋の消磁

1. はじめに

XFEL の加速器トンネルの断面内部はほぼ 4m の矩形でその外は厚さ 2m のコンクリートがあり表面から 10cm の深さなどに太さ 16mm や 32mm の鉄筋などが使われている。建設終了後フラックスゲート型磁力計で床や壁表面など測定すると向きも一定でなく強さも 1G 程度（地球磁場 0.5G ）のところも多く、鉄筋などの磁化が推測された。その中で電子銃を設置する付近の上下方向の磁場が高さ 80cm のビーム軸上、長さ 4m にわたり -0.1G から $+0.4\text{G}$ まで大きく変化していたため電子銃付近の磁場は平滑化することが求められた。そこでまず所有している空芯のコイルと直流電源で鉄筋の磁化が変化可能なことを確かめた。さらに鉄筋などの消磁専用で作られた電源とコイルにより床、壁に消磁を施した。この消磁機の基本性能や鉄筋の磁気特性などを調べ、また原因調査として工場段階での磁化も測定した。

2. 屋外、トンネル内の地球磁場

磁性体が近くにない場合は本来の地球磁場が観測される。加速器棟の北側屋外で 1 軸のフラックスゲート型磁力計（株）ガウス製 TO-828）で測定すると磁石の北、水平から 42 度ほど下に傾けると 0.49G 程度と最大になり理科年表の値に近かった。（理科年表：姫路 大きさ= 0.47G 、偏角=西に 7° 、伏角= 48° ）

トンネルの断面は図 1、2 に示すように鉄筋は表面に近いところにメッシュ状に埋め込まれている。

加速器トンネルは東西から東回りに約 7° 回転している。そのため図 1 に示す座標系 X は磁北からみると約 14° 東に回転している。Y は上向き Z は

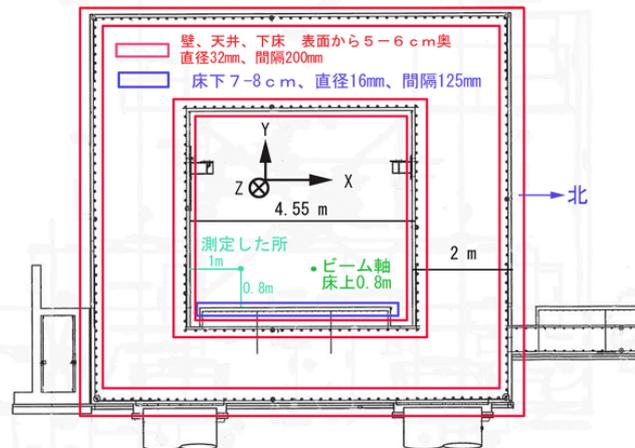


図 1. 加速器トンネル断面図と鉄筋。



図 2. トンネル内上床（40cm 分）の鉄筋。

トンネル長手方向である。

長手方向の変化を調べるため長さ 400m にわたり高さは電子ビーム高さと同じ 0.8m 、南側の壁から 1m のところを 20cm おきに 3 軸のフラックスゲート

ト磁力計 (MEDA 製) で測定した。(図4) 上下方向の磁場は場所により3mで0.9Gも変化しているところもある(図5)。フーリエ変換してみると通り芯間隔7.5mの倍数のところで大きくなっているのがわかる。(図6)



図4. トンネル内での測定。

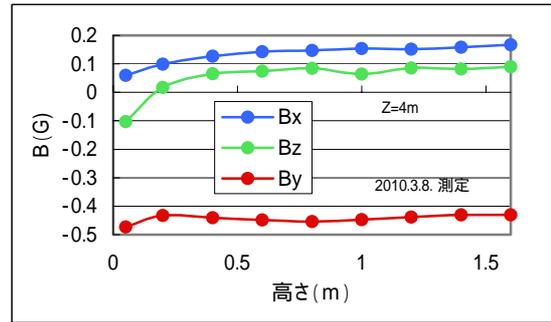


図8. 上下方向の磁場変化。

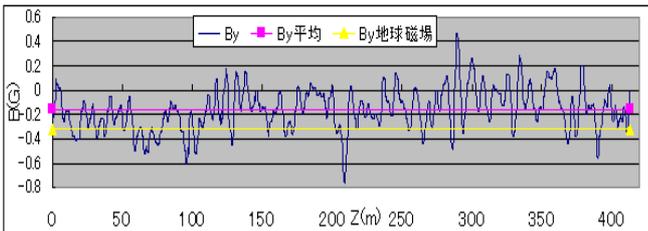


図5. 加速器棟上下方向磁場。

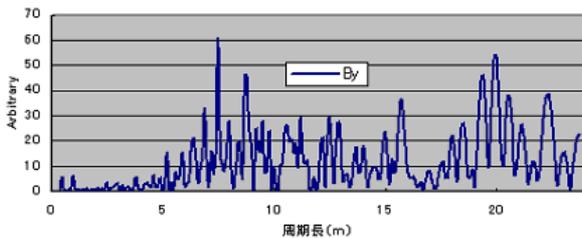


図6. 上下方向の磁場 By の周期性。

トンネル 400m にわたり平均した磁場と本来の地球磁場を比較した。(表1) 今回の測定場所では大きさは2割程度鉄筋などにより減衰している。

表1 加速器トンネル内の磁場と地球磁場、減衰

	Bx(G)	By(G)	Bz(G)	B(G)
平均(G)	0.25	-0.16	0.07	0.37
地球磁場(G)	0.31	-0.32	0.08	0.48
減衰	0.2	0.5	0.1	0.2

さらにトンネル内で南北方向(図7)、上下方向でも測定した。(図8) 壁に近いと大きくなっている。測定した場所では上下の変化は小さかった。

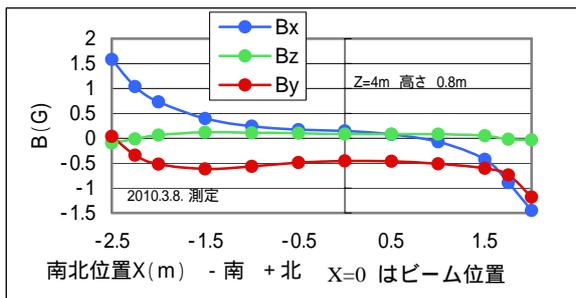


図7. トンネル内の南北方向の磁場変化。

3. 鉄筋の消磁

3.1 消磁方法

マンションなどで鉄筋の磁化によりテレビのブラウン管の色ずれが発生し消磁を施すということが実際に行われていた。そのための機器として大容量のコンデンサーに高電圧で充電しコイルとのあいだで共振回路をつくり抵抗による減衰する交流電流の磁場で磁化を消すものが市販されている。今回用いたのは、東洋磁気工業(株)製(X0-A)で図9の設定でコイルによる磁場を測定した。

表2: 着脱磁電源装置、コイル。

コンデンサー	5000 μ F 電圧最大 900V
コイル	1m \times 0.7m 20 ターン インダクタンス 0.9mH



図9. 消磁電源、コイルと電流・磁場測定装置。

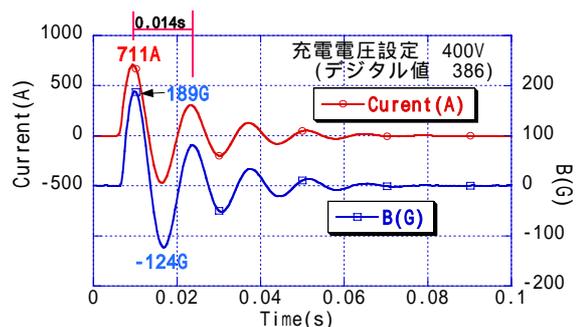


図10. 電流と発生する磁場波形。

2 辺の長さ 2a、2b 矩形コイルの中心付近の磁場は電流を I として

$$B = \mu_0 \frac{I}{\pi} \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{ab}$$

から 711A の時に 198G となるが実際にも 189G と近い値になっている。1 回目のピークから逆方向のピークはすでに 124/189=66%と 2/3 に減衰するので場合により磁化は残ることも考えられる。

直径 10mm 長さ 140cm の鉄筋に強い永久磁石を吸着、磁化させ、図 11 のように表面から 10cm 奥に鉄筋がある想定でコイルの端面から 10cm 離して置いて消磁した。ホール素子を鉄筋に接触させて消磁前後で測定した 2 本の結果を図 12 に示す。鉄筋は、コイル幅 0.7m より長いが大幅に消磁できている。ただし充電電圧が例えば 400V 程度では消磁の効果はあるが減衰の程度は低かった。



図 11. 鉄筋の消磁実験。

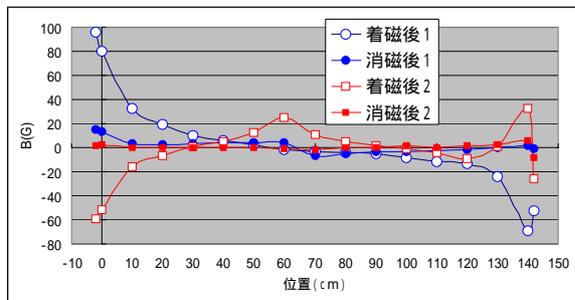


図 12. 消磁前後の鉄筋の表面磁場。

3.2 消磁作業

入射部のイレギュラーな 1m×3m の床の By を 10cm メッシュで測定したのが図 13 である。通常、磁場は床下に向かうがこの青い領域は逆であった。

当初この付近を含む領域 2m×4m を主にコイルを Z 方向に床に立てて消磁し (図 14.a)、ビーム軸である床上 80cm での磁場の改善を試みた。しかし、難しく、そこでコイルを床に密着させる横置きに変更した (図 14.b)。“消磁”と言うが実際には少し磁化が残る。この磁場は印加電圧によるのでこの電圧を細かくコントロールすることで正常なところの床の垂直方向磁場を目標にコイルをずらせながら作業をすすめた。この時、一軸のフラックスゲート型磁力計 ((株) ガウス TO-828) で垂直磁場を測定

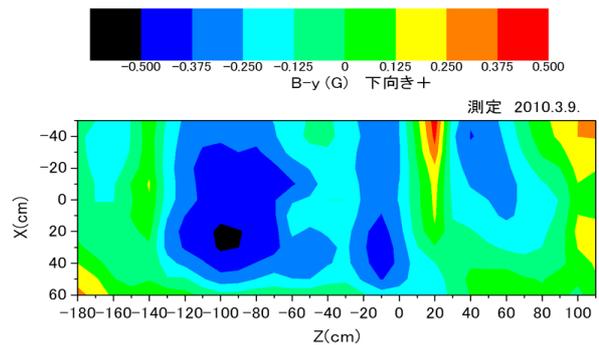


図 13. 入射部垂直方向磁場。

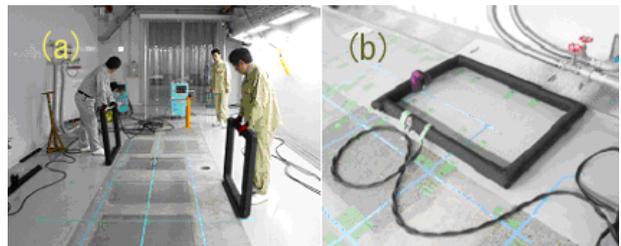


図 14 コイルの置き方 (a)縦置き(b)横置き。

し床に記録することで、変化を把握しながら作業をすすめることができた。

まずトンネルの南側 1/3、次に北側 1/3 を調整、さらに中央の筋を行うと調整したはずの北側、南側が少し戻っていた。正確な磁気回路が把握できない、コイルの大きさが磁気回路に比べ小さい、コイルの中に鉄筋を通すことができない、などの困難さがあり床だけでは難しくコイルをクレーンでつったりしながら北側の壁も消磁を施した。By ばかり修正していると Bx が変化し再度床を調整した。



図 15. 壁の消磁。

4. 結果

4.1 消磁直後

結果は図 16 のように By が大きく改善された。Bz は変化するがビームへの影響は考えにくいので無視している。5m にわたり上下方向 (By) $-0.3 \pm 0.03G$ 、水平方向 (Bx) $0.22 \pm 0.03G$ まで平滑化した。これによりコイルで入射部数 m にわたり磁場をキャンセルすることができる。

実際には高さ Y 方向は床面、0.4、0.8、1.2m、X 方向、1、0.5、0、-0.5、-1m、Z 方向は-4m から 6m まで 0.5m ごとこれらを 3 軸のフラックスゲート磁力計 (Bartington 社 Mag-03) で測定した。XY 平面に投影した磁場の消磁前を図 17 上段、消磁後を同下段に示す。各塊の左端は Z=-4m で右に行くにつれ Z 方向下流になり右端は Z=6m の磁場を示す。

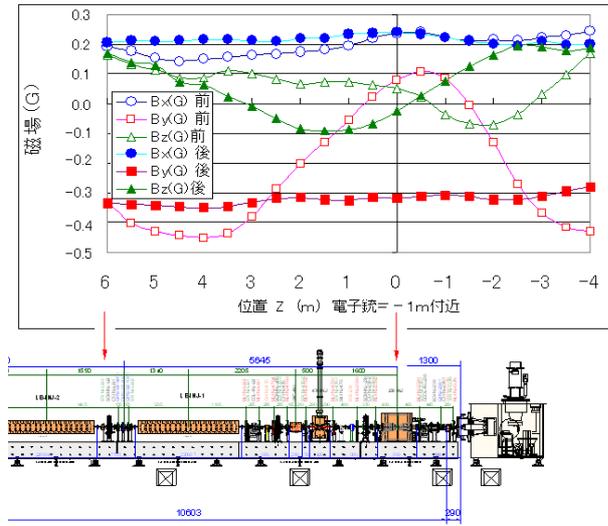


図 16. ビーム軸上の消磁前後の磁場。

高さ 0.4m 以上幅 1.5m にわたり平滑化できたことがわかる。X=1.0m の北側の壁に吸われていた部分が壁の消磁により改善できている。図 16 に示したのはこの内 X=0m、Y=0.8m の 21 本である。

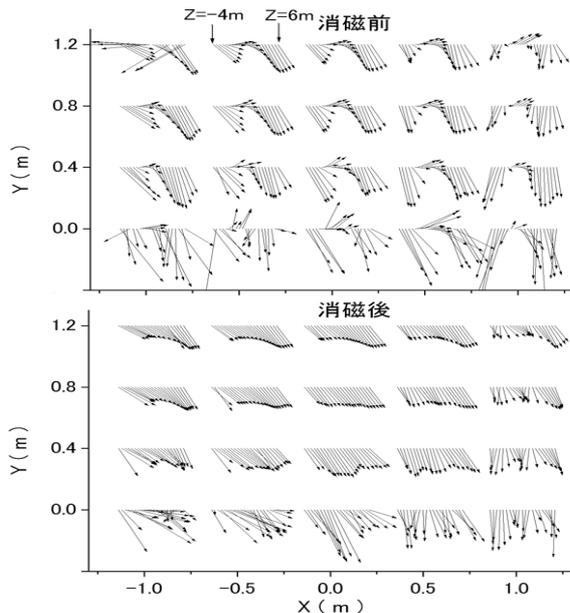


図 17. 幅 2m 高さ 1.2 m 長さ 10m の領域での消磁前後の磁束密度。

4.2 消磁後の変化

消磁後まもなく機器が据えられたため測定困難となり、また磁石など磁性体も設置されているが、測定できた点について消磁直後の値と比較した。

図 18 は高さ 1.2m と床面で測定している写真である。すでに磁場キャンセル用のコイルが設置されている。図 19 は床面で消磁直後、2.5 ヶ月後の By が赤の実線と点線で示されており改善された分がやや戻っているようにも見えるが大きな変化は見られない^[1]。1.2m の高さでも同様である。(図 20)

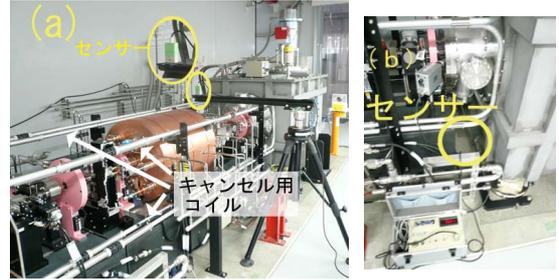


図 18. 高さ 1.2m(a)と床面(b)での測定。

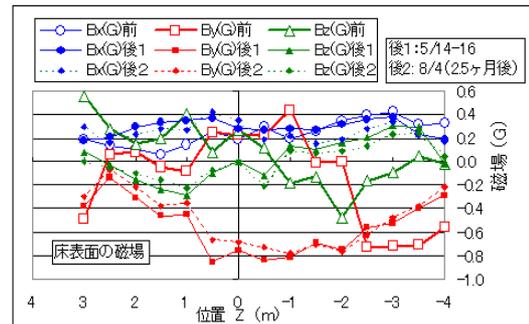


図 19. 床面での消磁前、直後、2.5 ヶ月後。

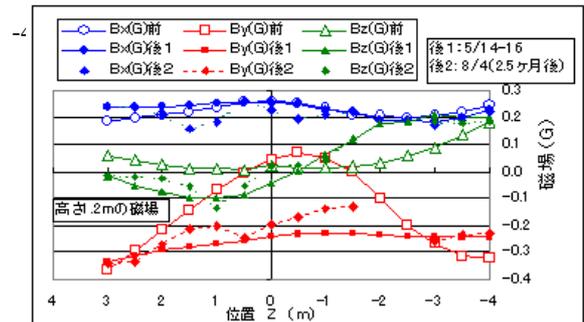


図 20. 高さ 1.2m での消磁前、直後、2.5 ヶ月後。

5. 磁化の原因と非磁性鉄筋

5.1 購入した鉄筋

ホームセンターで購入した鉄筋 20 本の内、端面の磁場が 43G あった例を図 21 に示す。

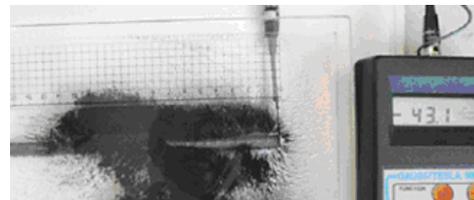


図 21 鉄筋端部の砂鉄の流れでみる磁場の様子。

5.2 鉄筋の磁化特性

直径 10mm、長さ 140cm の鉄筋を円形に曲げエナメル線を 1340 回巻きギャップ 1.5mm にホール素子を挿入し 1 回目電流 5A (CT で測定) 2 回目 10A まで流し BH カーブを測定した。直流 B-H カーブは環状鉄心法などで測定されるが鉄筋は比透磁率が低いのでギャップの影響は少なく図 22 の設定で行った。結果の図 23 で 4A での B と原点を結ぶ直線で

の比透磁率は 60 程度であった。実際にはギャップを 2.0、2.5mm と広げると 0.5mm で B は 1 割以上減少するので正確には磁束の拡がりを無視できないが、珪素鋼板のような電機用ではないので低く、また 0.4-0.5T の低磁場で飽和に近づいているのがわかる。



図 22. B-H カーブ測定。

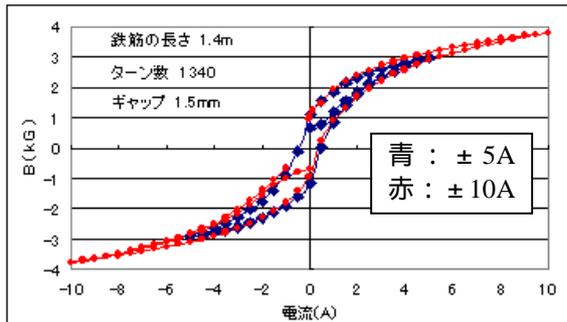


図 23. 鉄筋の B-H カーブ。

5.3 工場での磁化

工場で鉄筋を製造した後扱いやすい数mに切断しその後の運搬にはリフティングマグネットが一般的に使用されている。今回鉄筋工場を見学させていただき束になって運搬された後磁化の状態を測定する機会を得た。この工場ではクレーンの下部に2つの電磁石が取り付けられており鉄筋の束4つを一度に吸着し移動していた。直径 16mm 長さ 4.5m の鉄筋が移動後置かれている状態で、図 24(a)は束の表面をホール素子 (F.W.BELL 社 Model 4048) で、また束の 30cm 上をフラックスゲート型磁力計で測定している様子である。(図 24(b))

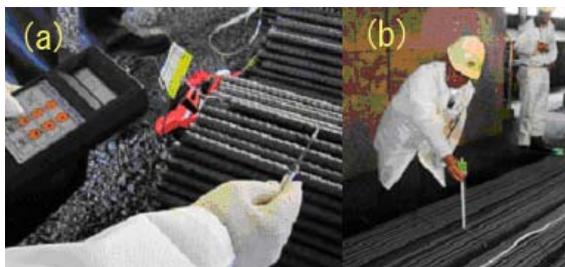


図 24.(a)鉄筋の束表面(b)束から 30cm 上で測定。

図 25 はその結果でグラフからも電磁石が吸着していた 2 箇所が推測できる。また直径 32mm の鉄筋の束の端部で 12 本計ると、隣だから近い値という傾向もみられず 15G から 55G までばらついた。

5.4 非磁性鉄筋

マンガン系の鉄筋で透磁率が 1.1 以下という製品があり、またステンレス鉄筋というのものもある。磁化

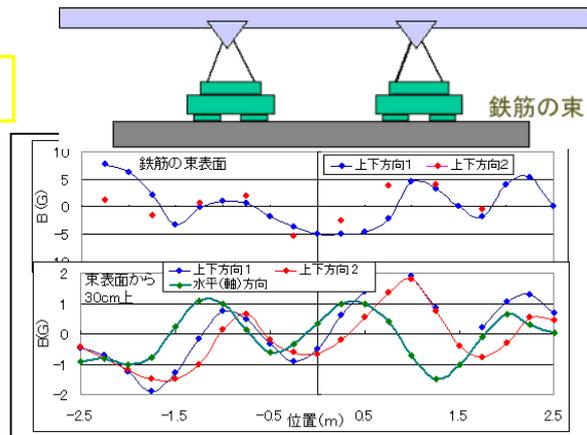


図 25. 鉄筋の束の磁場測定。

が気になるところではこのような製品を使うのが得策と考えられる。SPring-8 での使用実績もある。

5. まとめ

1. 加速器トンネル内で地球磁場が数 m で 0.4G 程度変化していた領域で鉄筋の消磁により 0.1G 以下まで平滑化できた。
 2. 2 ヶ月後も大きな変化はみられない。
 3. 消磁作業に用いたコイルは鉄筋の磁気回路に比べ小さく、移動して使うと先に調整したところで元に戻る傾向にあり収束に時間がかかる。
 4. 当初溶接による磁化を疑ったが (スタッド溶接のような場合は磁化が考えられる)、多くの鉄筋の工場ではリフティングマグネットを使って運搬する、またその後も同様の作業が繰り返されることから建設に使用する前の段階でもすでに磁化している。
 5. 設計時に鉄筋の磁化が問題になるとわかっていたら非磁性の、またはステンレスの鉄筋を使用するのが得策と考えられる。
 6. 加速器棟の鉄筋によるシールドの効果は壁から 1m の所で平均で大きさは 2 割程度減衰している。
 7. 鉄筋の比透磁率は測定した例で 100 程度と電機用の珪素鋼板などに比べかなり低く、飽和磁化も 0.5T 程度 (珪素鋼で高いもの 1.7T) と小さかった。
 8. 加速器棟で今回入射部で問題になるような数 m で磁場が 0.5G 程度変化する所は多い。
 9. フラックスゲート磁力計はホール素子のようなドリフトなどがなく、もれ磁場など弱い磁場の測定に便利である。
- フラックスゲート磁力計は消磁作業などに非常に便利な測定器でした。借していただいた JASRI 大橋裕二氏、理研 大竹雄次氏に感謝します。

参考文献

- [1] 笠井泰彰, 山本恭, “磁界の向きによるテレビ画面の色ずれ障害調査とその対策” “大林組技術研究所報”, No.66, 2003.
- [2] 梶原暁, “消磁システムの開発”, “清水建設研究報告”, 86 号平成 19 年 10 月.
- [3] 山崎慶太, 加藤和夫, “磁界解析による鉄筋・鉄骨の脱磁方法の研究”, “日本建築学会大会学術講演梗概集”, (北海道), 2004 年 8 月.