

## 交流用高電流密度超伝導線材の開発に関する研究

三浦, 大介

<https://doi.org/10.11501/3120512>

---

出版情報 : 九州大学, 1996, 博士 (工学), 論文博士  
バージョン :  
権利関係 :

## 第5章. 総括

現在検討されている超伝導交流応用機器は様々な条件下で使用されるので、各種機器の使用要請に応じた交流超伝導線材開発が必要とされている。交流用線材の高性能化に関する要求課題は主に高電流密度化、低交流損失化、高安定化である。しかしながら現状の交流用実用線材であるNbTi線材の高電流密度化に関しては、フィラメント径が非常に小さいためにピンニングセンターの導入が困難であり、十分な臨界電流密度が得られているとはいえず、またその設計指針も確立されてはいない。一方、NbTiと並ぶもう一つの実用超伝導線材であるNb<sub>3</sub>Sn線材は、超伝導特性がNbTiよりはるかに優れ、また外的擾乱に対してクエンチマージンが大きいなどの利点を持つが、フィラメントのサブミクロン化が困難であることや、近接効果、及びフィラメントブリッジングなどによるフィラメント間結合が起きやすく、交流損失が大きいことが重要な問題点である。

本論文は交流用超伝導線材に関するこれらの要請と現状の問題点を鑑みて、さらに高性能な交流用NbTi線材及びNb<sub>3</sub>Sn線材の開発に関する研究を行ったものである。その研究内容としては、

- (1) 交流用NbTi極細多芯線材の臨界電流密度向上の為に人工ピンニングセンター導入法を適用し、その高臨界電流密度化と人工ピンニングセンター導入法による臨界電流密度の設計指針を確立すること。
- (2) Cu合金バリア技術を用いたブロンズ法による交流用Nb<sub>3</sub>Sn極細多芯線材の開発とその低損失化。

である。本研究で得られた成果は以下のように総括できる。

2章では交流用NbTi極細多芯線材の臨界電流密度の向上、及びその設計に関して、従来の $\alpha$ -Ti型線材、及び直流用人工ピン型線材の特性を考察し、新たに交流用NbTi線材に適したNbアイランド型的人工ピンニングセンターの設計を行った。その結果、従来の交流用線材では不可能であった広範囲の磁界における高 $J_c$ 化を達成し、ピンニングセンターのサイズ、間隔を変化させることによりピン力が広範囲の磁界領域で増加し、かつ最大ピン力も高磁界側にシフトする脱飽和特性を得ることが可能となった。ピン力の設計に関しては、磁束間の揃断に関する相関距離 $l_{66}$ と磁束格子間隔 $a_f$ との間に $2l_{66} < a_f$ の関係が成立すれば、最大ピン力の磁界はピン間隔によって決定されることが明らかになり、またその成立条件として、要素的ピン力の下限值が示された。この結果、線形和モデルによるピン力の磁界依存性の設計が可能となり、 $J_c$ の設計指針が明らかになった。

3章ではさらに実用化への前段階として、人工ピン型交流用NbTi線材による100KVA級の高磁界交流マグネットの設計を行い、実規模サイズのビレットによる人工ピンの $J_c$ 設計の妥当性、及び高 $J_c$ 線材を用いたマグネットの有効性を検証した。線材の $J_c$ 設計として、マグネットの最大磁界2.5Tでピン力のピークを達成させるピン設計を実施した結果、ピークは予想通り2.5Tにおいて達成された。製作されたマグネットはAC60Hz、4.2Kにおける通電試験の結果、容量104.8KVA、電流値105.8Arms、電圧値991.2Vrmsの定常運転に成功し、その際の中心磁界は2.5T、最大経験磁界としては2.6Tの高磁界を発生した。また全交流損失測定の結果、中心磁界振幅2Tでの損失は4.8Wとなり、この時の容量69KVAに対して0.007%と極めて低いことが確認された。さらに1Tにおける交流損失は従来型交流用線材を使用した交流マグネットと比較して約1/3以下に減少し、高電流密度の線材を用いること

による機器の小型化の有効性が実証された。

4章では $Nb_3Sn$ 超伝導極細多芯線を交流用としての使用を検討する為に、交流損失の低減化に関してフィラメントのサブミクロン化技術の確立を目的とした、Cu合金バリアを用いたブロンズ法による交流用線材製作方法を提案した。実際にその方法を用いて製作した線材の超伝導特性評価の結果、近接効果が十分に抑制された $0.3\mu m$ のフィラメント径が達成され、線材の大幅な交流損失低減が図られた。さらに開発した線材の一次撚線を使用した小型の交流マグネットの交流通電特性の結果、マグネット発生磁界 $0.5T$ 中での $50Hz$ 通電運転による交流損失は $178kW/m^3$ となり、交流用として開発中である他の製法による $Nb_3Sn$ 線材と比較して非常に低い値が得られた。この結果、本製作方法による交流用 $Nb_3Sn$ 線材は定常的な交流通電が十分可能であることが明らかになり、 $Nb_3Sn$ 線材の交流応用への道が開かれた。

最後に今後更に研究が必要とされる課題について述べる。先ず交流用人工ピン型 $NbTi$ 線材の設計については次の通りである。

- (1)  $Nb$ ピンへの近接効果による $NbTi$ 母材の $Bc2$ の低下原因を理論的に解明し、さらに近接効果の影響の少ない人工ピン物質の探索を行う。
- (2) 実際のピンニングセンターの形状をTEMにより観察してピン力との対応づけを行い、ピン力の設計に反映させる。
- (3) 人工ピンの物質の超伝導特性に関連するピンニングのメカニズムを明らかにし、さらに要素的ピン力の大きい物質を探索する。

またCuバリアを用いたブロンズ法交流用Nb<sub>3</sub>Sn線材の課題については以下の通りである。

(1) さらなる低損失化を推進するため、フィラメント径0.1μm程度の健全なフィラメントを製作する必要がある。そのために拡散バリア厚さを大きくし、Sn濃度をさらに低下させる。

(2) 近接効果の更なる抑制、及び結合損失を十分に低下させるために、拡散バリアに添加するSi、Mnを増加する。

(3) 安定化Cuを導入するための拡散バリアを検討する。

今後はこれらの方針に基づき、さらに高性能な交流用超伝導線材を開発する必要がある。

## 謝辞

著者に博士論文取得の機会を与えて頂き、本研究をまとめるにあたり終始暖かい御指導と御鞭撻を頂きました九州大学教授 山藤馨博士に心から感謝申し上げます。そして、本研究を遂行するにあたり、貴重な御討論と御指導を頂きました九州大学教授 船木和夫博士、並びに九州大学助教授 岩熊成卓博士に厚く御礼申し上げます。

九州工業大学教授 松下照男博士には磁束ピンニング現象に関して懇切丁寧な御指導と御助言を頂きました。ここに慎んで感謝の意を表します。

また、近接効果に関しては九州産業大学教授 坂本進洋博士、並びに九州産業大学助教授 阿久根忠博博士に御鞭撻を頂きました。さらに、山口大学助手 原田直幸博士には本論文をまとめるにあたり親切な御助言を頂きました。これらの方々に御礼申し上げます。

本研究は著者が古河電気工業株式会社に在籍中に実施したものであり、御社の多くの方々の多大なる御指導、御協力を頂きました。特に研究開発本部 田中靖三博士並びに松本要博士には大変お世話になりました。心から感謝致します。

また、超伝導製品部 井上至課長には線材の製作に関して、超伝導製品部 清水仁司課長補佐にはマグネットの設計に関して御指導頂きました。

さらには研究開発本部メタル研究所 志賀章二所長、及び超伝導製品部 池田長部長ほか、本研究の遂行に関して多くの方々にお世話になりました。ここに改めて御礼申し上げます。

最後に本研究をまとめるにあたり終始暖かい御支援、御鞭撻を頂いた東京都立大学教授 伊藤大佐博士に深く感謝の意を表します。

これらの方々に対して、ここに厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

1. 上田隆右、北村義弘：電気学会誌108 1117 (1988)
2. P.Tixador, Y.Brunet, P.Vedrine, Y.Laumont J.L.Sabrie. IEEE Trans.Magn. 27 2256 (1991)
3. O.Tsukamoto, N.Amemiya, T.Takao, S.Akita, K.Ohishi, H.Shimizu, Y.Tanaka and Y.Uchikawa, IEEE Trans.Magn.28 283 (1992)
4. D.Ito, E.Yoneda:Adv. Cryo. Engineering 35-A 653 (1990)
5. D.Ito, K.Tsurunaga, T.Tada, T.Hara, T.Okuma and T.Yamoto: Cryogenics Vol.32 ICEC Supplement (1992)
6. T.Hara, T.Okuma, T.Yamamoto, D.Ito, K.Tasaki, K.Tsurunaga IEEE PES Winter Meeting, 92WM239-4 PWRD(1992)
7. T.Tominaga, O.Takashiba, H.Fujita and K.Asano : Proc. of MT-11, 408 (1990)
8. J.T.Dederer, R.J.Hillenbrand, D.T.Hackworth and X.Huang : IEEE Trans. Magn. 27 1708(1991)
9. 唐 躍進、大上賀久、早川直樹、横水康伸、松村年郎、大久保仁、鬼頭幸生、三宅清市、神谷俊郎：電気学会超電導応用電力機器研究会資料、ASC-93-14(1993)
10. 岩熊 成卓、船木 和夫、竹尾 正勝、山藤 馨：低温工学 Vol.22 No.6 354 (1987)
11. E.S.Yoneda, I.Tasgiro, M.Morohoshi and D.Ito :Cryogenics Vol.31 655 (1991)
12. E.B.Forsyth, R.A.Thomas: Cryogenics 26 599 (1986)
13. T.Hara, K.Okaniwa, N.Ichiyanagi, S.Tanaka, Proc. of IEEE WM, 075-2PWRD(1990)
14. O.Miura, S.Tanaka, K.Miyoshi, N.Ichiyanagi, Y.Tanaka, H.Ishii, T.Hara Presented at ISS'95, Hamamatsu, JAPAN (1995)
15. O.Tsukamoto, Y.Tanaka, K.Oishi, H.Shimizu, S.Sato, Y.Yoneyama, S.Yatabe, T.Takao and T.Sugita :Cryogenics 30 (1990) 744
16. O.Tsukamoto, Y.Tanaka and S.Sato, IEEE Trans. Magn. 27 2248(1991)
17. P.Dubots, A.Fevrier, J.C.Renard and Hoang Gia Ky :J. de Physique, Suppl.1 C1-467 (1984)

18. Catalogs of alternating current superconducting wires presented by GECALSTHOM
19. 大松一也、嘉数 修、高橋謙一、佐藤謙一、林 和彦 住友電気 第141号 41(1992)
20. J.G.Bednorz and K.A.Muller:Z.Phys.B 64(1986)189
21. L.S.Fleishman, Yu.A.Bashkirov, V.A.Aresteanu, Y.Brissette and J.R.Cave : IEEE Trans.Appl. Supercond., Vol.3 570 (1993)
22. 岩熊成卓、川浪精一、和久田毅、式町浩二、木稲博之、船木和夫、竹尾正勝、山藤馨、田中靖三、三村正直、植田和雄、樋上久彰 低温工学 Vol.29 No.4 141(1994)
23. 福永哲也、太田昭男 低温工学 Vol.30 No.6 278 (1995)
24. K.Ohmatsu, M.Nagata, and M.Kawashima: IEEE Trans.Magn. Vol.25 (1989) 2105
25. Y.Kamisada, Y.Inoue, K.Takahashi, T.Ogawa, S.Meguro, M.Nagata, O.Kohno, K.Kamata, M.Ichihara, R.Ogawa: IEEE Trans.Magn. Vol.28 No.1 (1992) 291
26. 久保田洋二、尾近平八、小笠原武 低温工学 Vol.21 No.5 (1986)
27. Y.Iwasa: Cryogenics 19 (1979)705
28. M.Tinkham, Introduction to Superconductivity, McGraw-Hill, (1975)
29. 低温工学協会、超伝導・低温工学ハンドブック、オーム社、(1995)
30. F.B.Silsbee, J.Wash.Acad.Sci.,6,597(1916)
31. P.Klaudy, I.Gerhold IEEE Trans. Magn 17 153 (1987)
32. M.Kosaki, M.Nagao, Y.Mizuno, N.Shimizu and K.Horii: Cryogenics 32 885 (1992)
33. A.A.Abrikosov, Sov.Phys.TETP 5 (1957)1174
34. W.H.Kleiner, L.M.Roth and S.H.Autler Phys.Rev. 133 (1964)1126
35. J.Bardeen and M.J.Stephen, Phys.Rev.,140 A1197 (1965)
36. A.M.Campbell, and J.E.Evetts: *Critical Currents in Type I Superconductors*, Monograph on Physics, Ed. By B.R.Coles, and D.Phil, Taylor and Francis LTD., London, (1972)
37. G.Zerweck, J.Low.Temp.Phys. 42 (1981)1



38. I. Hlasnik, S. Takacs, V. P. Burjak, M. Majoros, J. Krajcik, L. Krempasky, M. Polak, M. Jergel, T. A. Korneeva, O. N. Mironova, and I. Ivan: *Cryogenics* 25 (1985) 558
39. H. Tateishi, and T. Onishi: *Proc. of the Int. Symposium on Flux Pinning and Electromagnetic Properties in Superconductors*, Matsukuma Press, Fukuoka Japan, (1985) 208
40. T. Matsushita, T. Honda, Y. Hasegawa and Y. Monju : *J. Appl. Phys.* 54 (1983) 6526
41. N. Harada, Y. Miyamoto, T. Matsushita and K. Yamafuji *J. Phys. Soc. Jpn.* (1988) 57 3910
42. T. Matsushita, N. Harada and K. Yamafuji *Cryogenics* 29 (1989) 328
43. F. Irie and K. Yamafuji: *J. Phys. Soc. Jpn.* 23 (1967) 255
44. M. Noda, K. Funaki and K. Yamafuji: *Mem. Faculty of Engineering Kyushu Univ.* 46 (1986) 63
45. G. M. Morgan : *J. Appl. Phys.* 41 (1970) 3673
46. G. Ries : *IEEE Trans. Magn.* MAG-13 (1977) 524
47. V. B. Zenkevitch and A. S. Romanyuk : *IEEE Trans. Magn.* MAG-13 (1977) 567
48. W. J. Jr. Carr: *IEEE Trans. Magn.* MAG-13 (1977) 192
49. B. Turck: *J. Appl. Phys.* 50 (1979) 5397
50. W. A. Fietz: *IEEE Trans. Magn.* MAG-13 (1977) 807
51. I. Hlasnik: *Cryogenics* 23 (1983) 508
52. F. Sumiyoshi, M. Matsuyama, M. Noda, T. Matsushita, K. Funaki, M. Iwakuma and K. Yamafuji: *Jpn. J. Appl. Phys.* 25 (1986) 148
53. 宮下克己、酒井修二、鎌田國尚、田中浩樹 *低温工学* Vol. 29 No. 6 (1994) 229
54. G. Deutscher and P. G. de Gennes, *Superconductivity* (Ed. R. D. Parks) Marcel Dekker, New York (1969) 1005
55. G. Fischer and R. Klein *Phys. Kondens. Materie* 7 (1968) 12
56. E. W. Collings: *Adv. Cryogenic Eng. Mater.* 34 (1988) 867
57. K. Yasohama, et al.: *IEEE Trans. Magn.* MAG-23 (1987) 1728

58. 立石 裕ら：電気学会論文誌108-A(1988)271
59. J.R.Cave, A.Fevrier and Hoang Gia Ky: Proc. of ASC (1986) MI-4
60. F.Sumiyoshi, M.Matsuyama, M.Noda, T.Matsushita, K.Funaki, M.Iwakuma and K.Yamafuji: Jpn.J.Appl.Phys. 25 (1986) L148
61. P.Dubots, A.Fevrier, J.C.Renard, J.P.Tavergnier, J.Goyer and Hoang Gia Ky: IEEE Trans. Magn. MAG-21 (1985) 177
62. W.J.Jr.Carr: J.Appl.Phys. 54 (1983)6549
63. N.Harada, Y.Mawatari, O.Miura, Y.Tanaka, and K.Yamafuji: Cryogenics 31 (1991) 183
64. A.C.Mota, P.Visani and A.Pollini: J.Low.Temp.Phys. 76 (1989) 465
65. T.Akune, N.Sakamoto, O.Miura, Y.Tanaka and K.Yamafuji: J.Low.Temp.Phys. 94 (1994) 219
66. Z.J.J.Stekly and J.L.Zar :IEEE Trans. Nucl. Sci., 12 (1965) 367
67. B.J.Maddock, G.B.James and W.T.Norris: Cryogenics 9 (1969) 261
68. M.N.Wilson: *Superconducting Magnets*, Clarendon Press, Oxford (1983)
69. P.J.Lee and D.C.Larbalestier Acta Metall. 35 (1987) 2523
70. P.J.Lee and D.C.Larbalestier J.Mat.Sci. 23 (1988) 3951
71. C.Meingast, P.J.Lee and D.C.Larbalestier J.Appl.Phys. 66 (1989) 5962
72. 松本要、田中靖三、井上至、和田克則、伊井秀樹：古河電工時報 平成元年12月第85号 7
73. E.Gregory: Cryogenics 27 (1987) 290
74. 熊野智幸、三宅清市、青木伸夫、市原政光 電気学会研究会資料 ASC-96-14 121
75. I.Hlasnik, O.Tsukamoto, S.Fukui, T.Kumano, M.Polak, J.Kokavec, M.Majoros, L.Krempasky and E.Suzuki: IEEE Trans.Appl. Supercond. 3 (1993) 1370
76. Y.Kubota, K.Yasohama and T.Ogasawara: Cryogenics (1989) Vol.29 312
77. 岸田卓也、垣内隆、水口大而、守田正夫、山田忠利、尾原昭徳、藤原康夫、藤原二三夫、吉崎浄 低温工学 Vol.26 No.3(1991) 197

78. まつ倉功和、宮崎隆好、井上康彦、宮武孝之、嶋田雅生、小川陸郎、溝俣洋一 電気学会論文誌A Vol.115 No.3 (1995)194
79. M.Sugimoto, M.Tange, K.Goto, N.Sadakata, T.Saito, O.Kono and Y.Ikeno Adv. Cryog. Eng. Mat. 38 (1992) 587
80. 米田えり子、伊藤大佐、高野一郎、袴田真志、熊野智幸、鳥居慎治、秋田調低温工学 Vol.27 No.4 (1992) 332
81. K.Ohmatsu, O.Kasuu, K.Takahashi, K.Sato and K.Hayashi: Proc. of ICFA Workshop on AC Superconductivity, Tukuba (1992)
82. K.Matsumoto, S.Akita, Y.Tanaka, O.Tukamoto, Appl.Phys.Lett. 57 (8) (1990) 816
83. G.L.Dorofeev, T.Yu.Klimenko, S.V.Frolov, E.V.Nikulenkov, E.I.Plashkin, N.I.Salunin, V.Ya.Filkin :Proc. MT-9 conf., (Zurich, Switzerland,1985) 564 (1986)
84. A.W.West and D.C.Larbalestier Adv. Cryog. Engng. 26 (1980) 471
85. A.W.West and D.C.Larbalestier IEEE Trans. Magn. MAG-17 (1981) 65
86. D.C.Larbalestier, A.W.West, W.Starch, W.Warnes, P.J.Lee, W.K. McDonald, P.O'Larey, K.Hemachalem, B.Zeitlin, R.Scanlan and C.Taylor, IEEE Trans. Magn. MAG-21 (1985) 269
87. C.Li and D.C.Larbalestier Cryogenics 27 (1987) 171
88. K.Matsumoto, M.Nakajima, Y.Tanaka and K.Osamura IEEE Trans. Magn. Vol.27 No.2 (1991) 1125
89. T.Matsushita and H.Kupfer J.Appl.Phys. (1989) 63 5048
90. K.Yamafuji, N.Harada, Y.Mawatari, K.Funaki, T.Matsushita, K.Matsumoto, O.Miura and Y.Tanaka Cryogenics (1991) Vol.31 431
91. T.Matsushita, S.Otabe and T.Matsuno Adv. Cryog. Eng. 36(1990) 263
92. E.S.Otabe and T.Matsushita Cryogenics (1993) Vol.33 No.5 531
93. H.Gotoda, K.Osamura, M.Furusaka, M.Arai, J.Suzuki, P.J.Lee, D.C.Larbalestier and Y.Monju Phil. Mag.B (1989) Vol.60 No.6 819
94. P.J.Lee, J.C.McKinnell and D.C.Larbalestier Adv. Cryog. Eng. Mat. (1990) Vol.36 287
95. O.V.Chernyj, G.F.Tikhinskij, G.E.Storozhilov, M.B.Lazareva, L.A.Kornienko, N.F.Andrievskaya, V.V.Slezov, V.V.Sagalovich,

- Ya. D. Starodubov and S. I. Savchenko Supercond. Sci. Technol. 4(1991)318
96. J.C. McKinnell, P.J. Lee and D.C. Larbalestier IEEE Trans. Magn Vol. 25 No. 2 (1989) 1930
97. L.R. Motowidlo, H.C. Kanithi and B.A. Zeitlin Adv. Cryog. Eng. Mat. 36A (1990) 331
98. K. Matsumoto, Y. Tanaka, K. Yamafuji, K. Funaki, M. Iwakuma and T. Matsushita Supercond. Sci. Technol. 5(1992) 684
99. L.R. Motowidlo, B.A. Zeitlin, M.S. Walker and P. Haldar Appl. Phys. Lett. 61(8) (1992) 991
100. D.R. Dietderich, S. Eylon and R.M. Scanlan Adv. Cryog. Eng. Mat. Vol. 38 (1992) 685
101. H.C. Kanithi, P. Valaris, L.R. Motowidlo and B.A. Zeitlin Adv. Cryog. Eng. Mat. Vol. 38 (1992) 675
102. S. Takacs Czech. J. Phys. B19 (1969) 1366
103. K. Yasohama, K. Morita and T. Ogasawara Proc. of ASC conference (1986)
104. E. Yoneda, D. Ito, I. Takano, S. Akita, S. Torii, T. Kumano, and E. Suzuki : Adv. Cryo. Eng. 38 (1992) 767
105. C. Meingast, M. Daeumling, P. J. Lee, and D.C. Larbalestier: Appl. Phys. Lett. 51 (1987) 688
106. 鈴木 光政、三橋 説 : 低温工学 28 (1993) 22
107. H. Kupfer and T. Matsushita J. Appl. Phys. 63 (1988) 5060
108. E. H. Brandt: Phys. Rev. B37 (1986) 6514
109. K. Yamafuji, T. Fujiyoshi, K. Toko, and T. Matsushita: Physica C 159 (1989) 743
110. K. Yamafuji, T. Fujiyoshi, K. Toko, and T. Matsushita: Cryogenics 29 Suppl. (1989) 245
111. E. S. Yoneda, D. Ito, I. Takano, S. Akita, S. Torii, T. Kumano and E. Suzuki: Adv. Cryo. Engineering, Vol. 38B 767 (1992)
112. N. Amemiya, I. Hlasnik, N. Ikeda and O. Tsukamoto: Proc. of ACSC92, Tsukuba, Japan, June 199 Tukuba, JAPAN (1992)
113. N. Amemiya, I. Hlasnik and O. Tsukamoto: Cryogenics Vol. 33 889 (1993)

114. K.Funaki, H.Ueda, F.yoshiya, M.Iwakuma, M.Takeo and K.Yamafuji  
:Cryogenics Vol.33 190 (1993)
115. D.Ito, E.Yoneda:Adv. Cryo. Engineering 35-A 653 (1990)
116. 岩熊 成卓、船木 和夫、竹尾 正勝、山藤 馨：低温工学  
Vol.22 No.6 354 (1987)
117. O.Tsukamoto, et al.:IEEE Trans. Magn. 27 2248 (1991)
118. T.Ishigohka, M.Yamamoto, N.Mizukami:IEEE MAG-23 No.5 3542 (1987)
119. 石郷岡、岡田、上條、山本：電学論B,111, No.4 (1991)
120. 岩熊 成卓、金高 仁、船木 和夫、田崎 賢司、山藤 馨：低温工学  
24 (1989) 262
- 121 秋田 調、石川 忠夫：電力中央研究所、研究報告書 T87015
- 122 岩熊 成卓、船木 和夫、山藤 馨：低温工学 25 (1990) 172
123. J.R.Cave: Cryogenics supplement 29 (1989) 304
124. S.Akita, S.Torii, H.Kasahara, K.Matsumoto, Y.Tanaka, T.Ajioka,  
and K.Tachikawa: Cryogenics 33 (1993) 199
125. 米田 えり子、伊藤 大佐、高野 一郎、袴田 真志、熊野 智幸、  
鳥居 慎治、秋田 調：低温工学 27 (1992) 332
126. 船木 和夫、上田 秀樹、古屋 史生、岩熊 成卓、竹尾 正勝  
山藤 馨：低温工学 27 (1992) 398
127. 雨宮 尚之、松木 隆典、塚本 修己、Ivan Hlasnik:低温工学 28  
(1993) 366
128. 秋田 調、石川 忠夫：電力中央研究所、研究報告書 T87107
129. T.Akune and N.Sakamoto: Private Communication
130. S.Okuda, M.Suenaga and R.L.Sabatini J. Appl. Phys. 54(1) (1983) 289
131. M.Suenaga, K.Tsuchiya, N.Higuchi and K.Tachikawa Cryogenics 1985  
Vol.25 (1985) 123
132. M.Thoner, H.Krauth, A.Szulczyk, K.Heine, M.Kemper ASC Coference  
(1990) Paper LL-1
133. K.Miyahara, F.Sumiyoshi, K.Funaki, M.Iwakuma, Y.Kubota, T.Ogasawara  
and K.Yamafuji Cryogenics Vol.26 (1986)234

134. B.V.Reddi, V.Raghavan, S.Ray and A.V.Narlikar J.Mater.Sci.18 (1983) 1165
135. D.K.C.MacDonald, Handbuch der Physik,14 (1956)
136. E.W.Collings, A.J.Markworth and K.R.Jr.Marken IEEE Trans.Magn. 25 (1989) 2491
137. M.Suenaga, D.O.Welch, R.L.Sabatini, O.F.Kammerer and S.Okuda J.Appl.Phys. 59 (3) 1986 840
138. B.A.Glowacki and J.E.Evetts J.Mater.Sci. 23 (1988) 1961
139. E.J.Kramer J.Appl.Phys. 44 (1973) 1360

## 記号表

記号	定義
a f	磁束線間隔
B	外部、内部磁界
B c	熱力学的臨界磁界
B c1	下部臨界磁界
B c2	上部臨界磁界
B c2 <sup>*</sup>	有効上部臨界磁界
B c2p	近接効果によるマトリクスの上部臨界磁界
B c2N	0 Kでのマトリクスの上部臨界磁界
B m	最大磁界振幅
B r	マグネット内部の径方向の磁界
B z	マグネット内部の軸方向の磁界
$\dot{B}$ 、dB/dt	磁界挿引速度
b	規格化磁界 ( $B / B_{c2}$ )
b m	最大ピン力の規格化磁界
C (T)	超伝導体の比熱
C p(T)	熱容量
C 66	磁束線のせん断に関する磁気弾性係数
D	線材直径
D c	拡散係数
D o	振動数項

$D_f$	フィラメント領域の直径
$d$	ピンニングセンターの磁束線方向の長さ
$d_i$	相互作用距離
$d_f$	フィラメント直径
$d_N$	フィラメント間隔
$d_{eff}$	有効フィラメント径
$d_p$	ピンニングセンターの直径
$d_s$	ピン間隔
$d_s^*$	有効ピン間隔
$d_t$	ガラス編組の厚さ
$E$	電界
$\delta E$	自由エネルギーの変化
$F_p$	巨視的ピン力密度 (ピン力)
$F_{pmax}$	最大ピン力
$f$	周波数
$f_p$	要素的ピン力
$H$	一周期当たりの液体ヘリウムによる冷却量
$h$	プランク定数
$I_c$	臨界電流
$I_t$	運転電流
$I_0$	0 次の modified Bessel function
$I_1$	1 次の modified Bessel function
$J$	電流密度
$J_c$	臨界電流密度
$J_{cp}$	近接電流密度

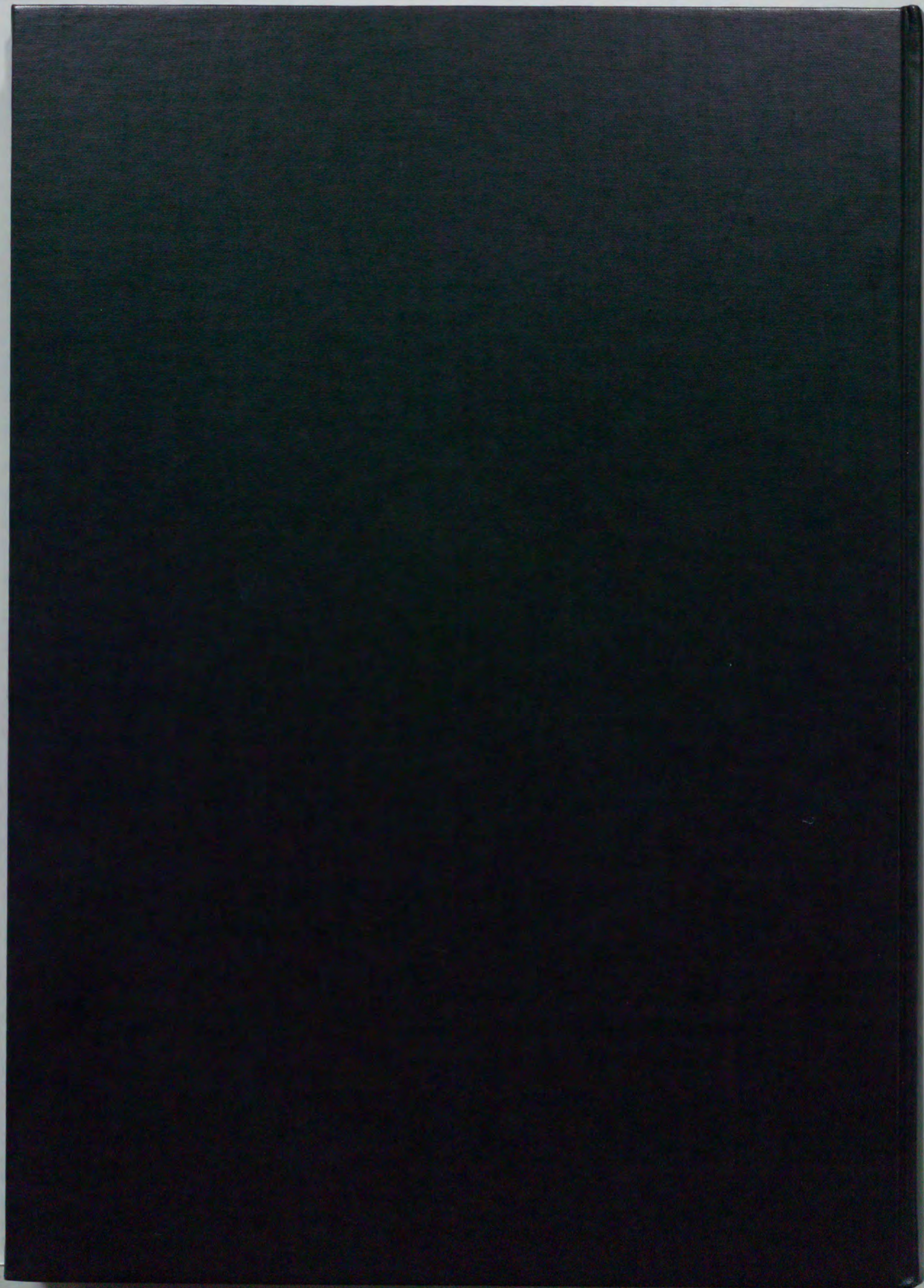


$J_{cp0}$	0 磁界での近接電流密度
$J_n$	常伝導巻線部の電流密度
$k_B$	ボルツマン定数
$L$	マグネットのインダクタンス
$L_p$	ツイストピッチ
$L_o$	ローレンツ比 ( $2.45 \times 10^{-8} W Q K^{-2}$ )
$l_{66}$	磁束線のせん断に関する相関距離
$l_n$	常伝導電子の平均自由行程
$\Delta M$	ある磁界における磁化の増磁、減磁の幅
$\Delta M_f$	フィラメントによる磁化
$\Delta M_p$	近接電流による過剰磁化
$m$	温度依存の項におけるピンパラメーター
$N_p$	単位体積当たりのピンニングセンターの数
$N_{pe}$	単位体積当たりの有効的なピンニングセンター (ピンニングサイト)
の数	
$P_{cf}$	フィラメント領域における結合損失
$P_{cs}$	シース領域における結合損失
$P_h$	一周期当たりの履歴損失
$P_s$	超伝導巻線部の単位体積当たりの損失
$P_t$	一周期当たりの交流損失
$P_{ts}$	超伝導巻線部の電力損失
$P_{tn}$	常伝導巻線部の電力損失
$p$	スケーリングパラメーター
$Q$	活性化エネルギー
$Q_{d0}$	擾乱の大きさ

$q$	スケーリングパラメーター
$R$	気体定数
$r(t)$	常伝導部の抵抗
$S$	線材の断面積
$S_c$	撚線単位長さ当たりの冷却面積
$T$	絶対温度
$T_b$	線材初期冷却温度
$T_c$	臨界温度
$T_{c0}$	バルク超伝導体の臨界温度
$T_i$	分流開始温度
$t$	時間
$V$	ピンニングセンターと磁束線が鎖交する体積
$V_s$	超伝導巻線部の体積
$V_F$	フェルミ速度
$V_n$	常伝導巻線部の体積
$V_e$	マグネットの定格電圧
$v$	磁束線の移動速度
$v_n$	常伝導部の伝搬速度
$W$	撚線単位長さ当たりの交流損失
$W_c$	単位時間当たりの結合損失
$W_h$	単位時間当たりの履歴損失
$W_t$	全交流損失
$X$	原子拡散距離
$\alpha$	ピンニングパラメーター
$\gamma$	ピンニングパラメーター

$\gamma_c$	巻線部で磁界にさらされない部分の割合
$\delta$	ピンパラメーター
$\delta_x$	量子化磁束の変位
$\epsilon_f$	最終時効熱処理後の線材の加工率
$\zeta$	冷却効率
$\eta$	ピンニング係数
$\eta_c$	過負荷安全係数
$\theta_0$	冷却温度 (4.2 K)
$\theta_c$	定格電流密度における臨界温度
$\kappa$	G-Lパラメーター
$\lambda$	線材体積中の超伝導体の占積率
$\lambda_f$	フィラメント領域の超伝導占積率
$\lambda_p$	多芯線領域に占めるマトリクスの体積率
$\lambda_m$	超伝導線材に占める多芯線領域の体積率
$\lambda_{cu}$	線材断面積当たりのCuの占積率
$\lambda_h$	等価熱伝導率
$\lambda_0$	0 Kにおける磁界侵入長
$\lambda_L$	磁界侵入長
$\mu_0$	真空中の透磁率
$\xi$	コヒーレンス長
$\xi_n$	常伝導体のコヒーレンス長
$\xi_c$	Hlasnikの比較指数
$\rho$	マトリクス比抵抗
$\rho_l$	マトリクス横方向の比抵抗
$\rho_n$	Cuの常温での比抵抗

$\tau$	結合時定数
$\chi$	磁化率
$\omega$	角振動数
$\Phi_0$	量子化磁束単位 ( $2.07 \times 10^{-15} \text{wb}$ )
$ \Psi ^2$	超伝導電子密度の存在確率



Inches 1 2 3 4 5 6 7 8  
cm 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19

# Kodak Color Control Patches

Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black



# Kodak Gray Scale

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19



© Kodak, 2007 TM: Kodak