

温度勾配の対称性を利用した空洞冷却技術の開発

DEVELOPMENT OF CAVITY COOLING SCHEME USING SYMMETRY OF TEMPERATURE GRADIENT

清水 洋孝#

Hiroataka Shimizu

KEK High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

In accelerator facilities using superconducting acceleration technology, it is common to cool the acceleration cavity and electromagnets housed in a vacuum insulation layer called a cryomodule using a cryogen such as liquid helium. Large-scale accelerator facilities often employ a direct immersion method for cooling by installing a dedicated helium liquefaction plant. In such case, a helium storage container (called jacket) is often attached around the cooled accelerating cavity. While the body of the acceleration cavity is often made of pure niobium, metal such as titanium is used for the jacket, and the joints between these are made of bimetal structure. It is known that when cooling a structure containing such dissimilar metal junctions, a temperature gradient is generally generated, which induces a thermoelectromotive force, and as a result, a magnetic field is generated around the accelerating cavity. In order not to impair the performance of the superconducting accelerating cavity, which extremely dislikes the trapping of magnetic flux, it is important to understand the characteristics of the induced magnetic field in detail and to consider appropriate cooling methods for safely cool it down. Based on the above ideas, we report on the development of cavity cooling technology using the symmetry of temperature gradients.

1. はじめに

超伝導加速技術を利用した加速器施設では、クライオモジュールと呼ばれる真空断熱層の中に収められた加速空洞や電磁石を、液体ヘリウムの様な寒剤を用いて冷却する事が一般的である。大型の加速器施設では、専用のヘリウムの液化プラントを併設する事で、直接浸漬方式での冷却が採られている場合が多いが、この方式では、浸漬に必要となる液体ヘリウムの量を抑える工夫として、冷却される加速空洞の周りに、ヘリウム保存用の容器(ジャケット)が取り付けられる事が多い。加速空洞本体が純ニオブ製である事が多いのに対して、ジャケット自身は相転移を起こす必要が無い事から、材料としてはチタン等の金属が用いられる。結果として、これらの接合部では異種金属による溶接点が発生される事になる。このような異種金属接合を含む構造体を冷却する場合、一般には冷却時に系の温度対称性が破れる事で、温度勾配が発生する。それに伴う熱起電力が誘起され、結果として、加速空洞の周りに磁場が発生する事が知られている[1]。磁束の捕捉を極端に嫌う超伝導加速空洞の性能を損なわない様に、安全に冷却を行う為には、誘起される磁場の特性を詳しく理解し、適切な冷却手法の検討が重要であると考えられる[2]。この考えに基づいて、温度勾配の対称性を利用した、空洞の冷却技術の開発について報告する。対称性を利用した空洞の冷却を試みるには、寒冷であるヘリウムの供給と排出を制御して、任意の場所の温度をうまく冷却する工夫が必要となる。必要とされる箇所の部品を狙い通りに冷却するには、どの様に寒冷をジャケット内に供給する事が求められるかについても、併せて検討する必要がある。

2. 冷却に伴う磁場の発生について

まず最初に、冷却の過程において、空洞の周辺ではどのような変化が起こっているかについて整理する。ここでは簡単化のために、シングルセルの空洞を例に考えるが、複数セルへの拡張には原理的な変更は無い。

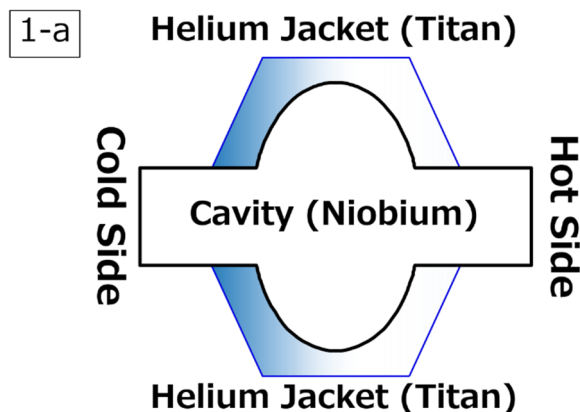


Figure 1: Schematics of the cavity covered with jacket.

Figure 1 に、ジャケットを装備した空洞に、温度勾配が付いて居る状態を示している。最初の例として、空洞の左側が冷えており、右側の温度が高い様な状態を考える。理想的な場合を仮定して、温度差の対称性が保たれて居る場合、即ち、空洞の長手方向にのみ温度差がついており、方位角方向の温度は全て等しい様な場合を考える。この時空洞を構成している Nb とジャケットを構成している Ti の異種金属接合が含まれている事に注意する。丁度異種金属接合の右端と左端に温度が発生する様な状況に対応して居り、両金属の熱電能の違いから、発生

hirotaka@post.kek.jp

した温度差に比例した起電力が発生する事になる。この

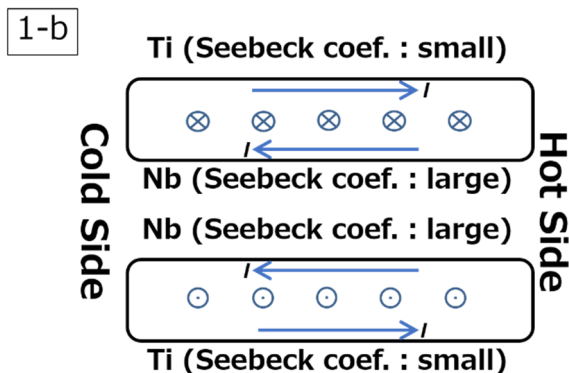


Figure 2: Electrical circuits of bi-metal structure.

様子を Fig. 2 に示した。実際の空洞とジャケットの構造を粗視化して、上下に2つの閉回路が並んでいる状態と捉え直す。この時、低温における熱電能の比から、Fig. 2 に示す様な方向に熱電流が誘起され、その電流が閉回路を周回する事で、ジャケットと空洞の隙間の空間に、磁場を誘起する様子が理解出来る[3]。Figure 2 では、空洞とジャケットの断面の構造から出発して、上下に閉回路が2つ並んだ構造へと解釈を広げ、発生する磁場の方向を確認した。この時、最初の空洞とジャケットの構造に戻り、各断面で発生する磁場の影響を足し合わせる事を考える。すると、断面に対になって現れる2つの閉回路で発生する磁場の方向は、常に互いに逆向きである事が解り、空洞の中心軸の周りに1周回転させて全体像を考えると、Fig. 3 に示す様な、周回する磁場が空洞を取り囲むように発生している事が解る。ここまでは温度の勾配が、左が低温、右が高温である様な高い対称性を保った場合で磁場が発生する方向がどの様に決まるかを求めたが、実際の空洞の冷却では、この様な温度勾配の対称性は、必ず破れて居り、発生する磁場の分布もより複雑になる。次にこの機構に関して詳しく検討する。

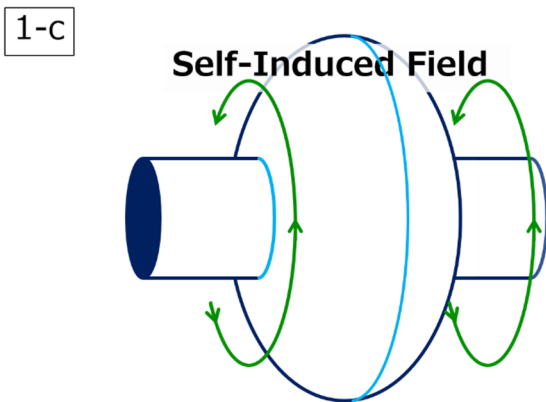


Figure 3: Schematic of self-induced magnetic field.

温度の対称性が破れた場合には、閉回路に対して、どの様な電流が発生するかを示した絵を Fig. 4 として載せる。ここでは例として、左右の温度勾配に加えて、上下方向にも温度の勾配が残った場合を考える。上下方向の温度勾配に関しては、上に向かう程温度が上がる条

件で考える。縦横2つの温度勾配を重ね合わせる事で、左下から右上に向かって、温度の勾配が発生している状況を表している。

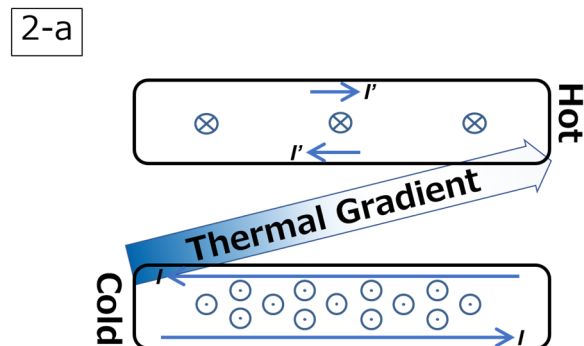


Figure 4: Electrical circuits with skewed gradient.

熱電能によって発生する起電力は、異種金属接合の両端の温度差に比例するため、今の場合、下側の閉回路を周回する電流の方が大きく、結果として、空洞とジャケットの間に誘起される磁場の強さも、空洞の上側と下側では異なる。先程と同じ様に、空洞の中心軸に対して、各断面を一回転させる事で、発生した磁場を滑らかに繋ぐと、Fig. 5 に示す様な、偏芯した自己誘起磁場の分布が発生する事が解る。空洞とジャケットの間の空間に発生する磁束の量は、空洞の上側では少なく、下側では多い。素直に断面積を回転させると、下側で沢山発生した磁束が、空洞の上側の空間に回り込んでしまう為、回転の何処かで、発生した磁場が、空洞とジャケットの間の空間から逸脱する事になる。この事は、熱電能によって誘起された磁場が、空洞の表面を横切って、閉じた磁束の輪を作っている事を示唆している。

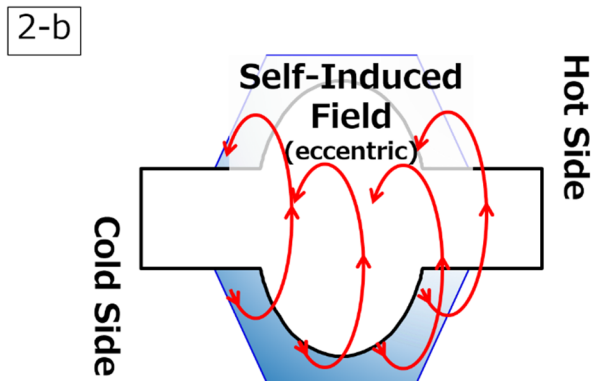


Figure 5: Eccentric self-induced magnetic field.

つまり、温度勾配の対称性が破れた一般的な空洞の冷却の過程では、冷却に伴って発生した自己誘起磁場が、空洞に捕捉される危険性が高い事を示している。

この状況が実際に起こっている事は、簡単に確認する事が出来る。Figure 6 に LCLS-II で実装されて居る、空洞の冷却方式と空洞の周波数調整装置を含めた冷却の過程を示す[4]。LCLS-II では、冷却の初期に、空洞の下側のヘリウム供給口から寒冷を送り込み、空洞の上下方向に大きな温度差を発生させ、空洞の下側から超伝導転移を起こさせる事で、空洞表面を横切って居る様な磁

束を、下から上に掃き出す事を意図した特殊な冷却方法が採用されて居る。この冷却方法では、空洞の左右方向の温度差の発生は望まれておらず、上下方向にのみ温度差を付ける事が期待されて居る。しかし実際には、LCLS-II の空洞には、片側にのみ周波数調整機構が取り付けられており、このチューナーが大きな熱浴の働きをする為、自ずと左右方向の温度勾配の対称性が破れてしまう。結果として、Fig. 4 で示した様な、斜め方向に向かう温度勾配が支配的となり、Fig. 5 に示した様な、偏芯した自己誘起磁場が発生してしまう。LCLS-II では、圧縮機の圧力を活かして、超臨界状態の寒冷を送り込み、左右方向の温度勾配の影響が顕著になる前に、空洞全体の転移を終える事を狙い、寒冷の供給量によって、冷却の対称性を保つ努力が為されて居が、系自体の構造が持つ複雑性から、完全な勾配の対称性を保持したままの冷却は難しいと思われる。つまり、自己誘起磁場の捕捉に伴う、空洞性能の劣化が起こっていると考えるのが素直である。

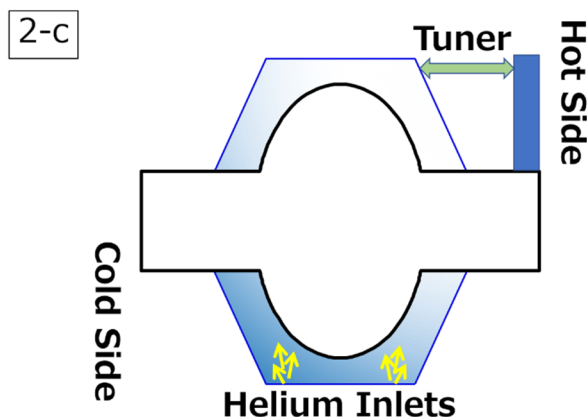


Figure 6: Actual cavity cooling situation in cryomodule.

ここまで見て来た様に、異種金属接合部を含む系に、寒冷を流し込む事で、冷却の過程のみに発生する、一時的な磁場がある事が解る。これは空洞が納められている空間の残留磁場とは本質的に異なる磁場であり、如何に冷却開始前に空洞周辺の環境磁場を小さく抑える工夫をしたとしても、影響を排除出来無い、動的な種類の磁場である事に注意する必要がある。この影響を、原理的に空洞から排除する為に、冷却途中の系が本来持つ温度勾配の対称性に注目する。ここでは例として、寒冷の供給口の開度の調整と、寒冷の排気口の設置場所を調整する事で、温度勾配の対称性を回復させる事を考える。Fig. 7 に、系の対称性を回復させた冷却過程の例を示す。

ここでは、供給口からの寒冷の供給を均等に行うのではなく、積極的に上下方向だけではなく、左右方向の温度差も利用する事を考える。供給口の開度を調整する事で、Fig. 8 下側に示される様な、左右方向の温度勾配を発生させる。(左側が低温で、右側が高温になる様にする)その一方で、寒冷の排気口を右側に寄せる事で、供給された寒冷が、ジャケット内から出て行く際には、必ず空洞の周波数調整機構側を通る様にする。排出口周辺にはより低圧側に流れ出ようとする寒冷の気体が集まって来る為に、寒冷の密度が高まり、接触する金属から、よ

り効率的に熱を奪う事になる。

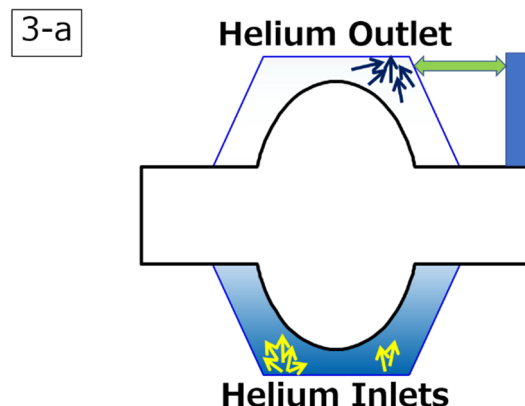


Figure 7: Recovery of the thermal gradient symmetry.

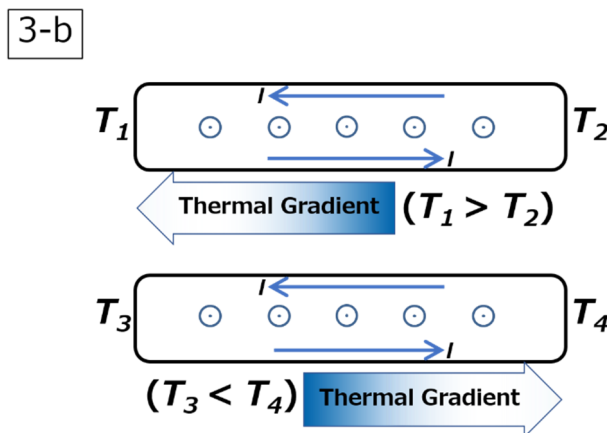


Figure 8: Electric circuit of recovered symmetry model.

つまり、排気される寒冷によって、空洞の上側には、下側とは異なった温度の勾配が形成される。(左側が高温で、右側が低温になる勾配)これまでと同様に、閉回路の模型を考え、誘起される熱電流の方向や発生する磁場の方向を考えると、Fig. 8 に示された様な分布となる事が解る。ここで注意すべき点の一つあり、閉回路に誘起される電流は、異種金属接合の両端が感じる温度の絶対値に影響される訳では無く、両端の温度差にのみ比例すると言う点である。つまり、空洞の下側が上側よりも相対的に冷えた状態にある事が自然であるが、流量や排気量を調整する事で、空洞の左右に発生する温度差の値を等しくする事は原理的に可能である。これはつまり、流れる電流の量が同じで、向きが逆となる温度分布を作り出せる事を意味している。系の持つ、冷却時にのみ現れる温度勾配の対称性を回復させた結果である。最終的な結果として得られる、自己誘起磁場の向きを書き入れた状態を Fig. 9 として示す。

空洞の受け側の閉回路で作られる自己誘起磁場と、下側の閉回路で作られる自己誘起磁場の向きが逆転して居り、互いに打ち消し合う様な向きに発生している事が解る。この工夫を冷却したい系に施す事によって、冷却の間にのみ現れる動的な自己誘起磁場の影響を排除して、転移時に磁束の捕捉を発生させない様な冷却が、

3-c

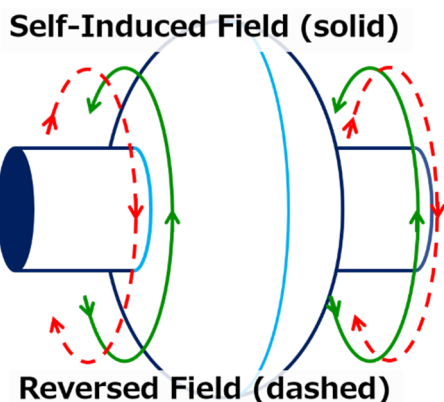


Figure 9: Induced field and its counter field to cancel.

原理的に可能である事が示された。

3. 寒冷の供給と排出の実装

ここでは、冷却中の系の温度勾配の対称性を回復させる為に必要な、寒冷の供給と排出の機構について考える[5,6]。Figure 10 に、簡単なノズルの形状と、入口と出口側の気体の諸元について示した図を載せる。入口側の気体の速度を ω_1 、圧力を p_1 、エンタルピーを h_1 、比体積を v_1 で表す。出口側の各物理量は、添え字を2に代えた物が対応する。ノズルの管径を d で表す事にする。

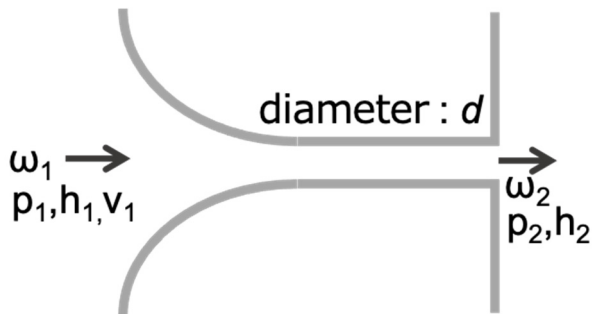


Figure 10: Nozzle figure and gas parameters.

今考えている流体(寒冷)は、乾いた気体(過熱蒸気)であると仮定して、流体の速度場の満たすべき方程式を考えると、

$$\frac{1}{2} (\omega_2^2 - \omega_1^2) = - \int_1^2 v dp$$

が得られ、その流路における v の状態変化が解れば実際に積分が実行できる。流路を気体が素早く通過する場合、断熱的な変化であるとみなせば、 pv^κ が一定の関係が成り立つ事から、実際に積部分が実行できて、次の表式を得る。

$$\frac{\kappa}{\kappa - 1} RT_1 \left\{ 1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(\kappa-1)/\kappa} \right\} = h_1 - h_2$$

つまりノズルを通過する前後の気体の運動エネルギーの差は、ノズルを通過する前後の気体のエンタルピー降下に等しくなる。流体がヘリウムの場合、この結果を表す $h-s$ 図を Fig. 11 に載せる。図中赤色で示した飽和蒸気曲

線よりも右側の領域は、過熱蒸気の相であり、図では例として、24kPa(4 K 相当)の等圧曲線と、3kPa(2 K 相当)の等圧曲線が描かれている。図の縦軸がエンタルピーである事に注意すると、ノズルを通過して、エンタルピー降下を経験すると、気体は温度が下がっている事になる。ベルヌーイの定理により、流体の速度が上がると、圧力が低下する事が示されるが、まさにこの事がノズル通過前後の流体で起こっている事が解る。更に簡単化のために、ノズルを通過する前の気体は、充分穏やかな運動をしていると仮定して、 ω_2 よりも十分に速度が遅いとして、 ω_1 の項を無視すると、流速係数 χ の表式として、

$$\omega_2 = \chi \sqrt{2RT_1}$$

$$\chi = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa - 1} \left\{ 1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(\kappa-1)/\kappa} \right\}}$$

が得られる。更にノズルを通過する気体流体は、連続である事から、流量 F に関して、

$$F = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 \sqrt{\frac{2 p_1}{v_1}} \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa - 1} \left\{ \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{2/\kappa} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(\kappa-1)/\kappa} \right\}}$$

$$= \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 \sqrt{\frac{2 p_1}{v_1}} \tau$$

と言う表式が得られる。 τ は流量計数と呼ばれる因子である。

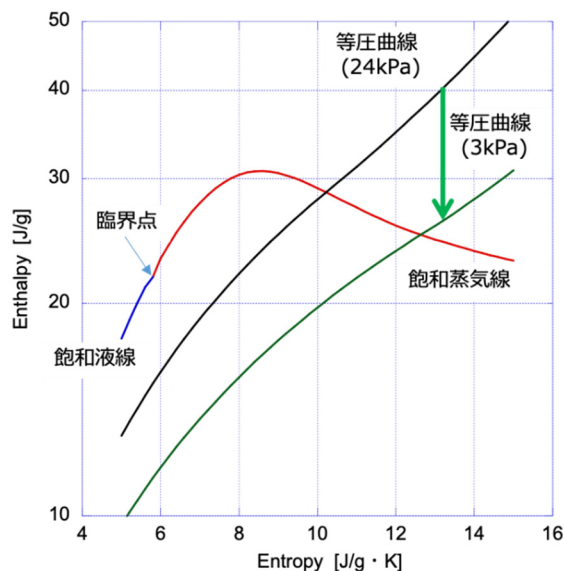


Figure 11: h-s diagram of helium.

Figure 12 に、単原子分子($\kappa=1.66$)の場合、二原子分子($\kappa=1.40$)の場合、及び三原子分子($\kappa=1.33$)の場合について、流速係数と流量計数を示した図を載せる。全ての κ の場合において、ノズルの出口の圧力が小さくなる(流体を押し込む際に感じる抵抗が無くなる方向)と、流速係数 χ は一方向的に大きくなる。つまり押し込まれた流体の通過した後の速度がどんどん早くなる事を示している。一方で、流量係数の方は、ある値で最大値を示した

後、反転して減少を始める。直感的には出口側の圧力が小さくなっているのに流量が減り続けると言うのはおかしいが、実際には出口付近で τ が最大値となった後では、背圧の影響を受けなくなり、出口端の流速が音速と一致したまま、変化しなくなる事が示される。つまり臨界流量に到達した後は、如何に出口側の圧力が低くなったとしても、臨界圧力以下には流体の圧力は下がる事は無い。出来るだけ沢山の寒冷をノズル越しに送り込む場合、この臨界流量以上の量は送る事が出来ないので、空洞に供給出来る寒冷の量を設定する際の一つの指標となる。逆に、排出側の気体の流れも、排出後の流体がノズル(戻り配管)を抜ける際の流量によって律速される事が解る。

quality factor”, Phys. Rev. ST Accel. Beams 16 (2013) 102002.
 [2] A. Romanenko, A. Grassellino, O. Melnychuk, and D.A. Sergatskov, “Dependence of the residual surface resistance of superconducting radio frequency cavities on the cooling dynamics around Tc”, J. Appl. Phys. 115 (2014) 184903.
 [3] A.C. Crawford, “A study of thermocurrent induced magnetic fields in ILC cavities”, arXiv:1403.7996v1: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1403.7996>.
 [4] G. Wu and S.K. Chandrasekaran, “Magnetic field induced by thermos electric current in LCLS-II cryomodule”, Proceedings of 19th Int. Conf. on RF Superconductivity (SRF2019) p.p.1005-1008.
 [5] 一色尚次, 北山直方, “わかりやすい熱力学”, 森北出版.
 [6] 藤田勝久, “基本を学ぶ流体力学”, 森北出版.

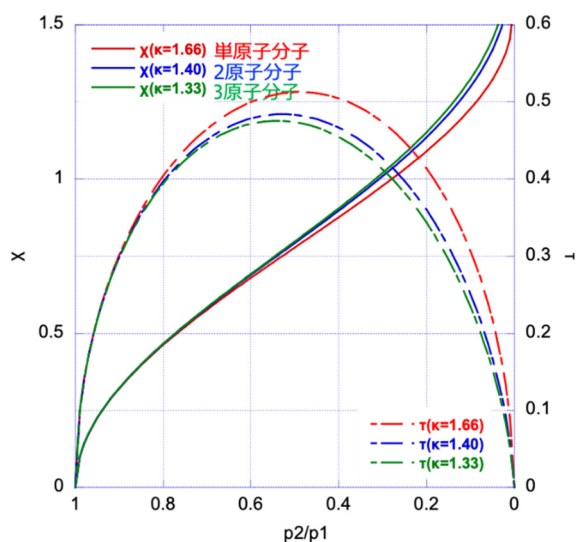


Figure 12: Several plots of χ and τ for various κ .

4. まとめ

超伝導加速空洞の冷却に伴う磁場の発生が、空洞の性能にどの様に影響を及ぼすかを知るために、冷却中に発生する自己誘起磁場について、その機構を整理した。誘起される過程を考え直す事で、冷却中の系の温度勾配に対称性を持たせる事が出来れば、原理的に誘起される磁場の影響を、空洞から排除出来る事を示した。この考えに従えば、供給・排出される寒冷の流路や流量に対して制限を加える事で、冷却中の温度勾配の対称性を回復させる事が可能である事が解った。寒冷の流れの制御に必要と考えられる、ノズルの形状とその時の流量に関して考察を行った。空洞や周波数調整機構の配置や形状は、求められる加速器の仕様によって固定される事がある。しかし超伝導加速空洞の性能を冷却時に劣化させない為には、これらの制限を踏まえた上で、最適な冷却の方法を別途考える必要がある。寒冷の流れの制御に必要と思われる幾つかの物理量について計算を行い、冷却方法の開発に向けて検討を進めている。

参考文献

[1] J.M. Vogt, O. Kugeler, and J. Knobloch, “Impact of cooldown conditions at Tc on the superconducting rf cavity