

パネルディスカッション

〈テーマ〉

常 電 導 か、

出席者

〈司会〉

永井 輝夫

(群馬大学医学部放射線医学教室)

亀井 裕孟

(電子技術総合研究所)

〈パネリスト〉

的 崎 健

(東京芝浦電気(株)医用機器事業部)

矢 崎 武人

(三洋電機(株)中央研究所)

岩 本 雅 民

(三菱電機(株)中央研究所)

竹 中 栄 一

(東京大学医学部放射線医学教室)

亘 弘

(国立生理学研究所)

佐久間貞行

(名古屋大学医学部放射線医学教室)

John P. Heinrich

(Intermagnetics General Corp., U. S. A.)

* 発表順・敬称略

* * *

永井(司会) それではパネルディスカッションを始めたいと思います。

まず、パネリストに一部変更がございます。東北大学の松沢先生が都合でおいでになれませんので、代りに I. G. C. のハインリッヒ (Heinrich) さんに、それから東芝の牧野さんがやはり都合がつかせませんでしたので、的崎さんをお願い致しました。

前半の司会は私がさせていただきます。まず最初に、各パネリストの先生方に6~7分ずつプレゼンテーションをしていただきます。それから、皆さんのお話が終わりましたら、各アイテムごとにディスカッションを進めていくことにいたします。その司会は亀井先生をお願いします。

このパネルディスカッションは、ご承知のように何か結論を出すというようなことはできませんので、装置の開発側、あるいはユーザーの側として、今後一体どんなふうに進展していくのであろうか、それにはどんな問題があるのであろうかということにとどまらざるをえないかと思います。

なお、この場では、プロトンの NMR イメージングに絞って議論していただきます。他核種の

NMR スペクトロメトリーは、また別の問題になりますので、そのことをご了解ください。まず最初に東京芝浦電気の的崎さんをお願いします。



的崎 健氏

的崎(東京芝浦電気) 東芝的崎でございます。NMR

超 電 導 か



第2回 NMR 医学研究会のパネリスト

イメージングの静磁界をつくるマグネットは常電導か超電導かというテーマですが、これはお聞きになる方には非常に興味ある、おもしろい話題かと思いますが、話す方にとってはまことにむずかしい。その辺をご理解いただきお聞き願いたいと思います。

まず、1番目に臨床上の要請がどうあるのかということです。臨床面は後でまた話が出ますが、結局、診断上どういう画像が望まれるのか、その辺が一つの大事なポイントであると思います。

2番目に、少しハード寄りの話をいたしますが、イメージングシステムでは、マグネットは一つのコンポーネントですので、一つのコンポーネントのみ取り挙げて議論するのは余り適切でないのではないかと。

すなわち、システムではシステム化の技術が大きなウェイトを占めております。私どもは常にシステム的な詰めをやりますので、一つのコンポーネントが変わっても超電導マグネットの要望があれば超電導を導入してもシステム化できると考え

ております。

3番目の問題として臨床家の要求に応じてどちらのマグネットでも選べるシステムをつくるということが考えられるかと思います。

4番目は超電導と常電導のメンテナンスの面です。初期投資の面は、後で論議するとして、メンテナンスの費用について考えてみました。例えば、1日8時間使うとして、月25日で計算しますと、電力代は月30万円くらい。超電導の方は、前提条件がありますが、液体ヘリウムを出しっぱなしとして1日24時間として考えます。それから液体窒素も必要です。そういうことを考え合せて、大体月160万円強かかることになります。月160万円は、メンテナンス上大変ではないかと考えられます。これも、冷凍機をつけてHeをリサイクリングさせますと、また変わってきます。そういう条件がありますが、これだけのメンテナンス費用をかけ、cost effectivenessが満足できるかというのが、現時点での課題ではないかと思います。

それでは、初期投資に関連して、一つの文献

(Peter Hanley, Oxford Research Systems Ltd.)
からとってきましたスライドを2枚ばかりご紹介
したいと思います。

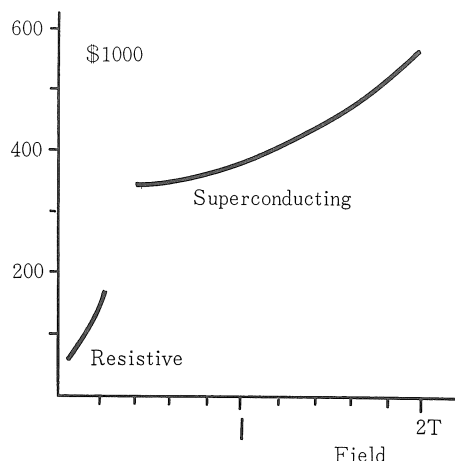


図1 Capital cost versus field strength for
0.8m bore imaging magnets

これはここに書いてあるように 80 cm のボアイ
メージング用磁石で考えているようです。これで
見ますと、常電導ですと図1のようなカーブにな
るのではないかと、あまり細かい数字より、全体の

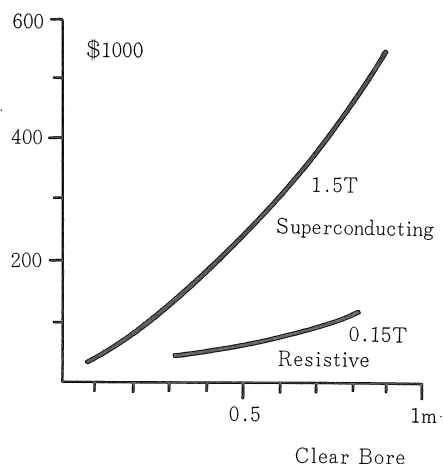


図2 Capital cost versus bore size for
imaging magnet

傾向で捉えたらいいと思います。

超電導の方は、こういう形で最初から高く、磁
場を強くできるが、費用はこのようにかかるとい
うことを示しております。

つぎは横軸に穴の大きさをとり、縦軸に値段を
とっているわけです。これで見ますと、常電導の
方はこういう大きさに対してこれくらいの費用が
かかる。超電導の方はこういうような費用になる
といえるようです。これも、あくまでも現時点で
の話とお断りしておきます。

永井(司会) 質問はまた後半でお受けするこ
とにして、つぎに進ませていただきます。それ
ではつぎに三洋電機の矢崎さんをお願いいたしま
す。

矢崎(三洋電機) 三洋電機の矢崎ございま
す。私どもは装置の開発側で
すが、マグネットはつくって
おりません。マグネットはむ
しろユーザーでの立場から超
電導か常電導かについて申し
上げます。

矢崎武人氏

最終的にどちらがいいかと
いうのは、使う側が決めるの
でありまして、私どもとしましては両方準備をし
ておかないといけないかと思っています。

技術的にはどちらかということですが、
マグネットに必要な磁場が非常に均一であること
と、電気的あるいは熱的にどれくらい安定である
かということからいえば、超電導の方がベターで
あるといえるのではないかと思います。

それから経済的な観点からは、先ほど東芝の
崎さんがデータを出されましたが、initial cost,
running costとも常電導の方がベターである
といえると思います。

それではテクニカルにどう違うかということ
を示すデータをお見せしたいと思います。

常電導マグネットはいろいろあるようですが、
いま現在 4coil ellipsoidal magnets のようです。

表

	Resistive	Superconductive
Coil Design	⁴ Coil Ellipsoidal	Solenoid
Field Strength	≤ 0.2 T	≥ 0.15 T
Static Homogeneity	$10^{-4} \sim 10^{-5}$	$10^{-5} \sim 10^{-6}$
Temporal Stability		
Long term	$\sim 10^{-5}/12$ hr	$\sim 10^{-7}/\text{hr}$
Short term	$\sim 10^{-6}/\text{min}$	
Thermal stability	Room Temp Temp Cooling Water	
Power Consumption	≤ 80 kW	LN ₂ 2l/hr LHe 0.5l/hr

超電導磁石はソレノイドコイルの場合、無限に長いコイルを使いますと、コイルの中は非常に均一な磁場になるわけですが、そんなに長いものはありません。それでいろいろな方式がありますが、これは3コイルになっておりまして、無限になるところをこれで近似しているというふうになっています。

この両方を数学的に比較してみると、磁場の強さは、常電導の方で可能なのは0.2T以下でしょう。超電導の場合には0.15T以上の高磁場が可能です。イメージングに必要なマグネットとして、まず磁場の均一性が非常に重要になるわけですが、常電導の場合には100~10ppmくらい。超電導の場合には10~1ppmくらい。あるいはもっと長いソレノイドにしたら、もっといいものができるかもしれません。

それからイメージングをするには、1枚の絵を撮るのに3分とか10分とかかかるわけなのですが、その間非常に時間的に安定でないといけません。これはほとんど電源で決まってくるわけで、超電導の場合には永久電流が使われ、電源に影響されないの、超電導の方が安定です。

さらに熱的安定性という問題があります。熱的に安定でないと、機械的に寸法が伸び、縮んだりして、それが均一度に影響を及ぼすわけです。これも超電導の場合には、ヘリウムにつかっている、コイルの部分は非常に安定だといえるのではないかと思います。

それから必要電力量ですが、常電導の方は6コイルの非常に大きな0.2Tくらいのもので、80kWくらい以下でしょう。超電導の方は、初めにCharging power が必要けれども、あとは永久電流を使いますとほとんど電力は要りませんが、その代り、液体窒素と液体ヘリウムが必要になります。

ということで、テクニカルには超電導がベターである。しかし initial cost, running cost は常電導がベターであるということですが、私どもメーカーとしては両方用意する必要があるのではないかと考えております。

永井（司会） どうもありがとうございます。

それではつぎに、三菱電機の岩本さんをお願いいたします。ご承知のように、三菱電機はほかの分野である超電導磁石を開発されておりまして、これをNMR イメージングにも導入の計画がありであるように聞いております。

岩本（三菱電機） 三菱電機の岩本でございます。早速スライドで説明させていただきます。

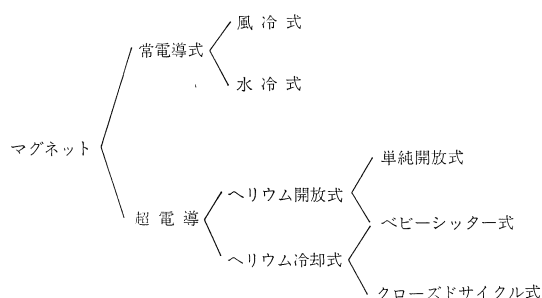


図1 マグネット方式の分類



岩本雅民氏

私がお指名にあずかりましたのは、恐らく超電導を推進するという立場でお話するようにということだと思います。

最初にマグネットの方式をスライドにしております。常電導と超電導がございます

が、一般に電気機械は、冷却技術の進歩で変わります。マグネットが常電導か超電導かということは、ひとつの冷却技術の進歩だと考えていただきたいと思います。常電導の場合は風冷かあるいは水冷です。超電導はヘリウム (He) で冷却するわけですが、He をたれ流していく開方式か、あるいはクローズドサイクル冷却式の二つの方式があります。さらに、その中間の段階としてベビシッター方式がございます。これは、He は開放しておきながら、しかも冷凍機をつけて蒸発量を抑えていく方式です。

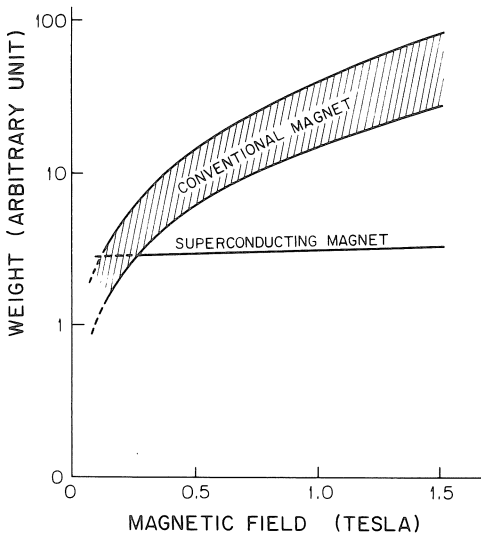


図 2 weight of whole body NMR magnet

つぎに超電導と常電導を比較したものを絵で紹介します。横軸が磁場、縦軸が重量ですが、超電

導はほとんど磁場への依存性はありません。傾向としては、磁場が高い方が重くなるわけです。常電導と超電導マグネットとは 0.1~0.2T の辺にクロスポイントがあるであろう、そういうことを示しています。

3 番目のスライドは、消費電力の問題について

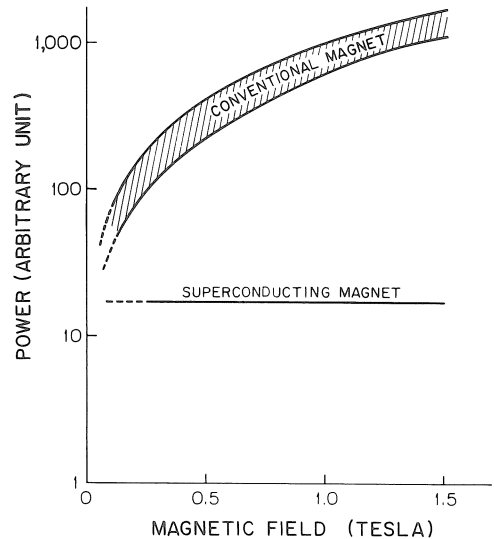


図 3 power capacity of whole body NMR magnet

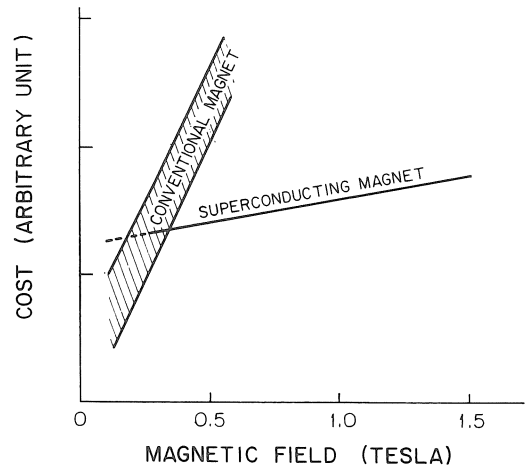


図 4 cost of whole body NMR magnet

です。超電導の場合は、クローズドサイクルのヘリウム冷凍機をつけると仮定しています。かなり低い磁場まで超電導が常電導よりも小さい電力消費で済むということを示しています。もちろん超電導の場合にはほとんど磁場依存性はありません。

最後はコストの問題です。コストは、生産技術が確立していない段階で議論するのは非常にむずかしいわけですが、大ざっぱな議論をさせていただきます。

このスライドはコストの推定を常電導と超電導について比較したものです。超電導の場合はあまり磁場依存性がない。あるいは逆にいいですと、非常に低い磁場の場合でも、かなりのコストがかかってしまうということになります。0.2~0.25 Tのあたりにコスト的なクロスポイントがあるのであるという推定です。

以上、私は超電導をやっている立場から、いろいろ検討しました結果についてご報告させていただきました。

永井(司会) どうもありがとうございました。

それでは開発側のお話のつぎに、利用者の代表として、まず最初に東京大学の竹中先生お願いします。

竹中(東京大学) いままでの NMR の開発の状況を見ますと、3, 4 年前でしたか、初めて Mansfield が腹部の写真を出したのですが、あのとき見たのは、横に図があるからわかるようなもので、これではいつ役に立つのかなと思っていたのです。

そのうちに、Nottingham の Hinshaw のグループが頭の断面を出しました(J. Comput. Assist. Tomogr.). あの写真を見たときは、これはすばらしいなと思った。しかし X 線 CT よりどれくらい勝っているかという点について、いろいろ問題はあったと思います。



竹中栄一氏

1981 年の 3 月から、Hammersmith 病院と CT を開発しました Thorn-Emi 社が、超電導磁石で臨床実験を始めました。しかし、去年の 7 月に UCSF の Kaufman 教授を訪門したときに、たまたま、いま写真が撮れたということで頭の写真を見せてもらった。これがすばらしい写真で、これはすごいな、Hammersmith の写真もよいが、この方がさらに優れており、やはり超電導の方がよいかなと思っていたわけです。

さらに今年の 3 月、UCSF で今度は腹部の写真が非常にきれいになっていまして、やっぱり超電導が優れていると思っていました。

私たちユーザーとしては、きれいな写真で診断に役に立てば、超電導でも常電導でもいいのです。値段のことは、極論すればいくら高くても私たちは値段のことは考えなくていいわけで、院長と大蔵大臣に考えてもらえばいいわけです。

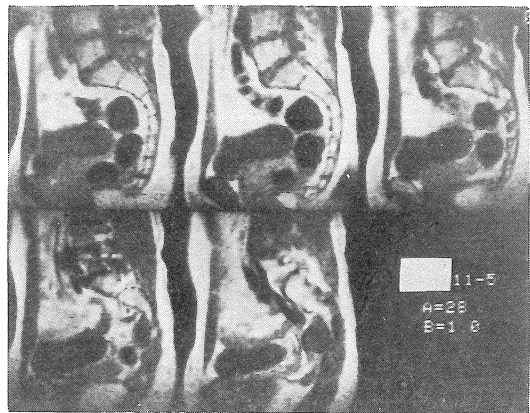


写真 1

これは Kaufman の写真で、腹部の断面です。これは 5, 6 分で 15 枚(マルチモード)撮っております。X 線写真では腰部の矢状断面はなかなか撮れません。約 0.5 秒から 1 秒、場合によっては 1.2~1.3 秒で撮れますが、画質が極めて悪いのです。NMR では約 30 秒くらいで画質のよい断面像が撮れている。FID で 4 回重ねているわけです。

けれども、こういうものが撮れることは非常にすばらしいと思います。

それから、NMR の特徴の積極的な利用としては、障害の点はことし（1982 年）2 月の NMR 医学研究会のセミナーでいろいろ問題が出ましたが、少なくとも妊婦だとか小児などには非常に便利で被曝がない。産道計測では妊婦はおなか非常に大きいですから、大変むずかしく、胎児の全身被曝のこともあります。NMR でいまのような写真が撮れることはいい。両方で優劣はある程度あるでしょうが、片一方が徹底的にやられるというのではなくて、やっぱり総合的な利用ということになっていくだろうと思います。

それから計測との併用、これはいろいろ技術的な難問題があるでしょうが、そういうことを考えているメーカーもあると聞いております。

つぎに、いろいろ話がありました、超電導のコストの問題です。先ほどの崎さんはコストを示しましたけれども、両方とも大して違わないという計算もあります。超電導では初期の冷却が問題であるが、ヘリウムの消費は放置しておいても、回収しなくてもコストとしては大したことはないだろう。そうでなければバルーンにためておいて、近くに冷却センターがあれば持っていったっていい。それからパイプでつないで置いて、時々連結して冷却することもできよう。

また、超電導 NMR は、1.5~2 million dollar で約 5, 6 億になります。しかし 5, 6 億内になれば、5,000 万くらいの小型冷却機などつけて置いて、どうせ予算を要求するなら 5 億要求するのも 7 億要求するのも一緒じゃないかとも考えられます。そのほか、小型冷却機のスペースの問題とか、高圧ガスの取り締まりの問題があります。

次にどれくらい He が蒸発して、その後 1 日のうち何時間冷却機を動かせばいいかという点ですが、He エスケープの問題は最近非常に改良されていると聞いております。人体用のものは知りませんが、東京大学で用いている計測用の数

年前のものと現在のものと比べると、He のエスケープ量が数分の一になっているということです。とすればそんなに冷却機を常時動かさなくてもいいのしょうから、レントゲン技師さんに、高圧ガスの資格をとっておいていただいて、時々冷却してもらって、月給をよけいに払えばいいんじゃないかということも考えられます。

これは UCSF の超電導の頭の写真です。こんなにすばらしい断面像がマルチモードで 6.5 分くらいで 5 断面 15 枚くらい得られております。

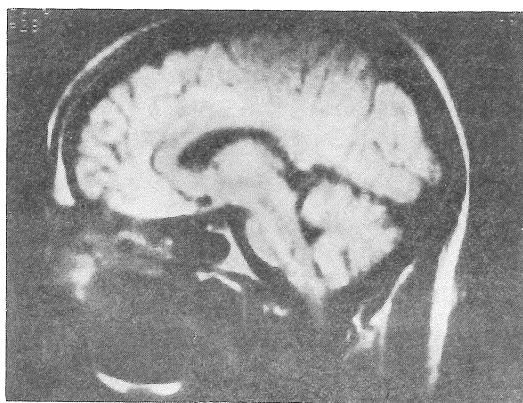


写真 2

脳幹の各部分は、解剖の本を見ると断面像で四丘体はどこだとか、視床下部はどこからどこまでかということがよくわかり、さらに神経核がどこにあるかという欲望がわきます。これらの断面から考え、やっぱり現時点では超電導が一番いい画をとらえていますから、それに非常に期待しているわけですが、さらにもっともっと内部の構造まで観察診断したいと考えています。

つぎに、上腹部の NMR-CT ですが、現在これだけの映像が得られており、これは X 線 CT とほとんど同じ。悪い X 線 CT だとこのくらいだと思います。しかし、 T_1 , T_2 で病変部位が割然と区別でき、その点 X 線 CT より診断能は高いと考えられます。

以上の観点から、現在得られている写真、それ

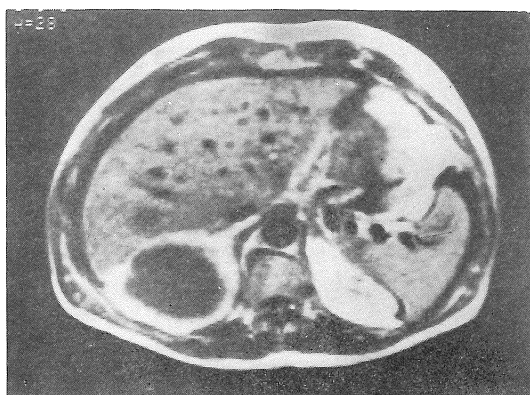


写真 3

からわれわれの医学的欲望から考えると、超電導の方が現在では良いと考えております。しかし、常電導もこれ以上の写真を描出し得るなら、あしたから常電導支持に豹変いたします。

永井（司会） どうもありがとうございます。それではつぎに、国立生理学研究の亘先生お願いいたします。TMR を使用なさった経験で、超電導磁石を用いられて、いろいろお考えになっていらっしゃることをお話し願いたいと思います。

亘（国立生理研） TMR あるいは高分解能 NMR の磁石は産業用の超電導磁石に比べ、大きさが違います。したがって、非常にスケールの小さい、みみっちい話をいたします。



亘 弘氏

われわれは 360MHz NMR を使っていますが、1 年経ってもほとんど共鳴周波数は変化しません。したがって、磁場の安定性という点では全然問題がありません。ただ線材の問題とか、線の構造の問題があって、一定の磁場 (8.5T) までの話です。

液体ヘリウムと液体窒素の使用量ですが、10 年前、200 MHz の高分解能 NMR が京都大学工学

部に入りましたが、1 日にヘリウムが 10l とか 20l という量だったと聞いています。ところが私どものところに入っている Bruker の 360MHz NMR では、ヘリウムは 1 か月に大体 50l、窒素は 1 週間に 50l という使用量で済んでいます。

ところで、TMR 用の超電導磁石の液体ヘリウムの使用量ですが、3 週間に 50l と、少し使用量が多いようです。窒素は 5 日に 50l 入れねばなりません。

ちなみに、われわれのところでは、液体ヘリウムは 2,600 円/l で買えます。横に分子科学研究所があり、その極低温センターではヘリウムの回収をすれば 600 円/l で供給されるけれども、数百 m はなれたところまで取りに行かなければならない不便があります。

このようなヘリウムの使用量も、真空度が問題になります。ヘリウムガスの出口に流量計をつけると、360 ml/分 が定常状態です。しかし、突然 600 ml とか 1,000 ml になることがあります。この場合、拡散ポンプで引っ張りますと、すぐに 350 ml までストンと戻ってきます。

しかし、昔に比べ使用量が減ったといっても、月に 1 回はヘリウムを入れなければいけませんし、1 週間ごとに窒素を入れなければいけないということは、非常にわれわれにとって苦痛です。動物を扱っているのと同じような気持ちがないといけません。また、ヘリウムの注文その他の問題もありまして、かなり前から周到的な準備をしないとうまく運営できません。

もうひとつはチャージの問題です。液体ヘリウムのデュアはアルミのものを買ったつもりでした。ところが現実に品物が入ってきますと、それが常磁性であって、磁場に吸いつくということがわかりました。

最後に、磁場の怖さですが、高分解能 NMR の場合には、静磁場の方向が縦形になっていますから余り感じなかったのですが、TMR の場合は横形ですので、磁場影響を直接うけます。

最近2回事故を起こしたのですが、1回はトタンのゴミ箱が、約1.5mの地点からすうっと吸いつけられ、3人で引っ張ってもなかなか取れないという事故でした。

また、動物を手術中、断頭に使ったノミを持って約1mのところを歩いていて、一緒に吸いつかれた。手術道具は1個1個はずしましたが、最後のノミがどうしてもはずせなくて本当に苦労しました。

そういう怖さというものは磁場が目に見えないものですから、よほど注意する必要があるのではないかというのが使用経験ですが、しかしそれでも、超電導磁石は非常にいいと私は感じます。

永井(司会) ご経験に基づいての大変おもしろい、また実際に役に立つお話をありがとうございます。

つぎに、名古屋大学の佐久間先生にお話を願います。ご承知と思いますが、佐久間先生は今度中津川に入ります Foner の機械の指導に当たられることになっております。

佐久間(名古屋大学) 名古屋大学の佐久間です。私は、常電導でなければとか、超電導でなければとか思っていない。全く竹中先生の立場と同じで、診断医として納得できる画像であればいい。これがまず大前提であります。

佐久間貞行氏

もうひとつは、患者にとって安全であるばかりでなく、従業員にとっても安全でなければいけない。この二つとも満足できるような装置であってほしいということです。

診断医の立場で考えると、診断は結局治療するために診断するわけですから、正しい治療に結びつくような診断が、NMR 装置でできるのかどうかということが重要だと思います。いまのところは非常にきれいな画ができたということで喜んでしまいます。そして解剖学の成書の画にこよなく

近い画が出ますと、何となく安心をするのです。

ところが診断というのは、解剖して患者さんの体を見て、何となくわかったということが直ちに診断に結びつくかという、やはりそうではないだろうと思います。病理診断は形態と染色化学に基づいた診断が現在のところ final な診断になっている。それが日常の診療の考え方の主役になっているわけです。

では、そこに NMR がどのくらいまで近づくだろうかということになると、場合によると心もとないところがある。というのは、現在の NMR 画像は、われわれが一番最初に望んだような化学的計測に絡んだ画像ではなく、ただ NMR の性質を使っただけの画像であります。この画像というのはもう一遍診断医が検討し、見直さないと、本当の画像かどうかかわからないのではないかと。近ごろ、そういうふうに思うようになってきました。

考えてみると、組織の T_1 がどうだから、そのもとはこうではないかと思うのですが、実際、いままでの T_1 の知識というのは純粋な組織であって、生体というのはこよなく複雑なものです。不純なものは従来の物理的な感覚で律しきれないだろう。そうすると、結局われわれは違ったものを見ていることになる。だからもう一遍これを実際の病気の状態にあてはめて考え直さないと、本当の解釈はできないんじゃないかということになってきます。そういう一番根本的な問題があるので、常電導か超電導かという問題よりは、そういう病的な状態を正確に出してくれる装置をまず期待しないとイケない。

そうとなれば、細かい画像、よくわかる画像を期待すると同時に、もう一方で、正しい治療ができればいいという感覚になりますと、そんなに細かくわからなくてもいい。病気が病気でないか、これは何であるかがわかればいいとなる。一番簡単なのは飛行場にあるような、鉄を持っていったらチンと鳴るようなもの、要するに癌だったらチンと鳴るくらいの機械だって、まずはいいかもしれ

ないくらいです。早期癌を見つけようとする集団検診で使われるには、本当はそういう機械の方がぐあいがいいんじゃないかと思います。それくらいの機械ですと、画像に集中しなくなつて、主題から外れたもう一つの方のものと元素に立ち返つたような機械がほしいということになってきます。

そういうことで、いい画になつたいい画になつたといひながら、少なくとも診断医が満足するような画にはいまのところまだなっていない。超電導も常電導の方も、とりあえずわれわれが納得できるような画をまず出してくださいということですから。

永井(司会) 大変含蓄のあるお話で、結論的には、ある開発段階まではメーカー独自でやられるのでしょうが、それ以後はやはりユーザーと密接な関連をもって、研究、開発をしていかないと、何を見ているかわからないということがあるとの指摘だと思います。

つぎにハインリッヒさんは特別講演の中で、常電導と超電導の比較を詳しくなさいましたけれども改めて短いお話をいただきます。

ハインリッヒ (I.G.C.) 3つの点についてお



ハインリッヒ氏

話したい。一つは米政府がNMRの実験について通達を出した直流磁界と変動磁界の制限についてのガイドラインです。直流磁界2T、変動磁界3T/秒というのがそれですが、これはあくまでガイドラインであつて、法律による規制

ではありません。日本で、このような制限が課されるかどうかわかりませんが、この制限は全身用NMRが医療に実際に使われる前に変わることがあると思います。I.G.C.は米国の全身用NMR機器供給者でつくっている会の一員ですが、ここでは3T/秒というのは低過ぎると思つており、近い将来20T/秒以上になると思つています。英国で

はすでに20T/秒が使用されています。

つぎはマグネットの時間的安定性ですが、超電導と常電導の比較をする時、注意する必要があると思います。というのは常電導磁石では安定性は電源できまり、その変動は本質的にランダムでノイズ的なものです。一方、超電導磁石では永久電流モードなので、純粹のインダクタンスと抵抗からなる回路できまり一定の減衰になるということです。

3つ目は、ヘリウムの消費量です。日本ではヘリウムが非常に高価なので、ヘリウムの消費量がキープポイントになることと思います。全身用NMRマグネットは大量のヘリウムを冷却のために必要とし、実際約3,000Lの液体ヘリウムが要ります。そこでI.G.C.では工場で冷却してテストした後、マグネットの温度を上げず、液体ヘリウムを貯留したままで出荷することを考えています。輸送中に蒸発した分のヘリウムを追加する必要がありますが、この場合は冷却用の何千リットルかは不要になり、たぶん何百リットルあればよいということになるでしょう。

永井(司会) どうもありがとうございました。後半は亀井先生に司会していただきます。

亀井(司会) ただいま7人のパネリストの方から、それぞれお話があつたわけですが、ここで討論に入りたいと思います。問題を絞つて、各項目ごとに進めていきたいと思つています。

まず最初は、プロトンのイメージングをするときの磁場の強さという問題が出てきます。そこで、常電導がよいか、超電導がよいかという答もまた出てくると思いますが、何Teslaぐらいがよろしいですか、的崎さん、いかがですか。

的崎 数値ではお答えできないかと思つても、たとえば磁界が高くなると、感度は上がりますが T_1 の差はだんだん小さくなってきます。そうしますと、臨床的に T_1 エンファンスイメージに価値を求めようと思つたとき、最適の磁界があるのではないかと考えます。しかし、それが何が

ウスかということは、私には答えられません。

亘 用いる変動磁界の周波数が上昇したとき、どれだけわれわれの体の中に電波が入るのでしょうか？

ハインリッヒ 数年前の文献では10MHz以上ではプロトンによるNMRのイメージングはできないといわれていたのですが、米国のダイアソニックスで0.35Tの磁界、つまり約15MHzを用いて電磁波の侵入の問題なしに非常によいイメージを得ています。ですから、侵入のソミットというのは、それほど正確なものではないと思います。米国では0.5~0.8Tが適当と考えられており、私も0.5Tくらいがいいのではないかと思います。

亀井(司会) 一般的に考えてみると、常電導の限界を超えた磁界ぐらいの方が有利ではないか、つまり、常電導ですと大体0.2Tくらいですが、実際には0.25Tないしそれ以上の方が、画像を撮るのに有利ではないか。

先ほどの崎さんが、高くなると T_1 の差が小さくなるとおっしゃいましたが、この程度の磁界では、 T_1 の差に対する周波数依存性はそれほど効いてこない。そういった意味では、超電導の方がやや有利な感じがするのですが、そうではないというお話はございますか。

もうひとつはinitial costの問題です。これは先ほど岩本さん、崎さん、矢崎さんから説明がありましたが、どちらの方が有利になりますか。岩本さんいかがですか。

岩本 先ほど説明しましたが、超電導と常電導とどこにクロスポイントがあるかということです。超電導はヘリウム液化機のペナルティーがあるわけですが、ヘリウム液化機自身はそれほど高価ではない。特にこの関係ですと、容量的に非常に似た冷凍機として、国鉄のリニアモーターカーを目指して開発しているものがあります。

ちなみに全身用装置のヘリウム消費量は1L/h以下です。冷凍機を含めても、磁場の高いところでは超電導の方が安くなるであろうということに

なります。

亀井(司会) running costについては、先ほどの崎さんは、月30万と160万と試算なさったようですが。

崎 試算の根拠をもう少し補足します。

冷凍サイクルなしという前提で試算しますと、液体ヘリウムが1時間当たり0.7Lくらい出ていくとすると、24時間で30日、3,000円/Lとすると、月1,512,000円。それから液体窒素が1L/hぐらいいで、24時間、30日とすると、170円/Lで135,000円。トータル1,647,000円/月になると思います。

亀井(司会) 申し訳ないのですが、私がやりましたrunning costの試算では、逆の結果が出てきます。

常電導が左、超電導が右側です。0.2T発生するときのことを考えて、電力は大体25kWがマグネットの消費電力で、電源のレギュレーターのロスが12.5kW、あと冷却水が12.5kW、トータル50kWになります。1日8時間動かしたとき400kWhが1日に使われる。電力料金は東京電力で21.32円として計算しますと、日に8,400円、一年間に300日稼動とすると、1年間で2,520,000円になります。

それから液体ヘリウムですが、来年あたり1L/日という全身用マグネット、また窒素も10L/日ということで、ヘリウムは私どもが外から買った場合に2,500円/L、窒素が50円/Lとしますと、1日3,000円。これはとめるわけにはいきませんので、365日使うとすると、1年で100万円ほどになるわけです。そうすると、この装置で5年間使ったとしても、その差は700万円ほどでしかない。ですからrunning costというのは、マグネットを考える上では余り考慮しなくていいのではないかと私は考えたのですが……。

こういった根拠に立ってrunning costを計算するかというのは、いまは皆目わからない状態ですので、これぐらいばらつくという例としてお示

ししたわけです。

竹中 小型冷凍機の場合、設置するのにスペースの規制とかはあるのですか。

岩本 高圧ガス法規の問題があります。解釈の分かれるところですが、法規の問題は開放式の場合は緩やかになると思います。液化式の場合はクローズドサイクルになると、強い規制を受けます。先ほどベビーシッター方式というのを申しましたのは、開方式でクラリオスタットの中間温度のシールドを冷凍機で冷却する方式でして、これは法的には緩やかになります。

的崎 いま亀井先生がおっしゃったのはサイクルつきではありませんか。

亀井(司会) ヘリウムは飛ばしております。

的崎 飛ばして1日1lですか。

亀井(司会) いまの普通の高分解能の装置ですと、0.2l/日くらいのものが完成しています。ですからそれからいきますと、全身用でも1l/日くらいのものも不可能ではないだろうということです。

矢崎 1日どれだけ消費するかという取り方が違うのではないかと思います、いかがでしょうか。

亀井(司会) 的崎先生のは1l/hだと思います。

的崎 0.7l/hです。

矢崎 超電導マグネットがどれくらいヘリウムを消費するかというデータによりますと、0.5l/hという現状のようでございます。

亀井(司会) 私が申し上げたのは現状というよりは将来です。たとえば、0.2T出すのに25kWの消費電力マグネットというのは、いまは全くありません。0.1Tで大体40kWぐらい使っております。それを最適設計をすれば、常電導でも0.2T出すのに25kWくらいの低消費電力のものが可能であろうということです。現在の技術でなくて申しわけないのですが、3年ぐらい先かもしれませんが、そのくらい十分いけるであろうという

形で試算したわけです。ですから、現在でどちらがいいかという問題になりますと、そのところは私にはよくわかりません。

亘 われわれのところで見てみますと、普通の100MHzの電磁石と比べて維持費において差があったように思いますが、5年間で700万くらいの差というのは考えにくい。

亀井(司会) 冷却システムに必要なのは、そこで使われる消費電力の大体2分の1くらいのパワーが必要なんです。先ほどスライドで示しましたように、マグネットが25kWの消費電力であれば、大体12.5kWのコンプレッサーがあればよろしいということになる。それから電源でのregulatorのロスが、悪いものと負荷で消費する電力と同じくらいロスしますが、いまの場合その半分と考えまして12.5kWとしました。そうしますと全消費電力は50kWになります。1日8時間使ったとして400kWhということです。

ハインリッヒ ヘリウムの蒸発に伴うコストの計算ですが、常電導マグネットの運転を1日8時間と仮定しています。X線CTでも米国では8時間運転のものもあれば24時間のものもあると聞いています。超電導マグネットはもちろん24時間ヘリウムが蒸発し続けるわけですから、両者の比較に際しては双方とも24時間運転すると思えるべきだと思います。

亀井(司会) いま指摘がありましたように、24時間としますと、これは常電導の方がはるかにパワーを食うことになります。

コストに関してはいろいろ問題が多いと思いますが、つぎに設置条件の問題に入りたいと思います。たとえば常電導の装置を入れたときには、どういったところを注意しなければいけないのか、その辺のところを拾い出していきたいと思います。矢崎さんいかがでしょうか。

矢崎 設置するときに非常に理想的な場所があればいいのですが、どうしてもいろいろの制約があって、建物の周りのアイアンピースが影響して

きます。そういう影響下で一番いいホモジニティーを得るには、その辺の調節が簡単な方がいいわけです。超電導については、具体的にどうアジャストするのかよくわかりませんが、多分でき上がったものはそのまま持ってきて、常電導のシムを使って調整するのだらうと思います。常電導の場合は簡単に調整して、その場所に速やかにフィットさせやすいということで、その点は簡単に対応できるのではないかという気がいたします。

亀井（司会） ただいまの常電導の場合には、電力をたくさん食うということで、何か特殊な、かなり容量の大きい電源設備を用意しなければならないということはあるのでしょうか。

矢崎 それは当然あります。使われる電力がほとんど熱になります。部屋の中に出る分と冷却水で取る分とがありますが、約3分の1くらいが部屋の中に出て、そのほかのものは水で取らなきゃいけないということで、常電導の場合には必要になります。

亀井（司会） 超電導の場合はどうかということですが、液化ガスを扱うと設備の問題の他に、法律の問題も出てくると思います。その辺のところはいかがですか。

岩本 ヘリウム液化機を使うと、やはり高圧ガス取り締まりの問題があります。そういう意味で設置に工夫する必要がありますし、その許可をとる必要があります。これは、開放式でたれ流しの場合には問題がないわけです。それからヘリウム液化機を使いますと、クローズドサイクルの場合、あるいはベビーシッターの場合でも、やはりコンプレッサーを使いますので、コンプレッサー室が必要になります。コンプレッサー室は騒音源になりますので、防音ということが問題になります。

それからもうひとつ、ヘリウム液化機はエンジンですので、可動部分を持っております。これをマグネットに近づけておくのが可能なのだらうかということがあります。

騒音の問題については、これは常電導の場合で

もそうですが、電源というのは、水冷の場合は問題ございませんが、風冷だとしますと、非常に大きなものと恐らく騒音の問題がありますし、あるいは電源室の問題もやはり出てくるわけです。いちがいに、これは超電導のペナルティーとはいえませんが、やはり超電導の方が、その辺の問題は相対的にちょっと苦しくなるというのは事実だと思います。

亀井（司会） それからもうひとつは、装置というのは順調に動いていれば何ら問題ないわけですが、必ず何らかの形で事故が起こります。たとえば、停電が起きると、常電導マグネットですと突然に磁場が切れてしまう。また超電導ですと、何らかの原因でクエンチングを起こせば、またそこでかなり短い時間の間に磁場がゼロになる。それが測定中だと、当然患者さんが入っている状態で、かなり急激な磁場の変化を受けます。その辺の安全対策というか、そういう事故については、常電導、超電導、どういうふうに考えていらっしゃると思いますか。

ハインリッヒ どんな医療機器でも患者にとって安全でなければならないわけで、超電導マグネットももちろん安全対策がとられています。超電導マグネットのクエンチはめったに起こるものではないのですが、万一起こった時でも患者にとって安全なことはいうまでもなくマグネットの損傷もありません。

マグネットのクエンチによる磁界の減衰は、例えば1.5Tのマグネットの場合、0.4T/秒でこれはグラジエント磁場に比べてすら小さな値ですから、患者に対して何ら問題はありません。ただひとつ記憶しておいていただきたいことは、クエンチによって膨大なヘリウムガスが放出されることです。これは10m²×3mの体積になりますので、マグネットを納める部屋の換気は大きな問題になります。

亀井（司会） 常電導についてはどうですか。

的崎 別に常電導派ではありませんが、停電い

たしましても電源に容量を相当持っており、突然磁界がゼロになることはありません。

それから設置環境に関連した話ですが、超電導は先ほどからの議論のように、冷凍サイクルがやっぱり一番決め手であると思います。しかし、冷凍サイクルは相当騒音が出るということと、それから大きなスペースをとることが問題になるかと思っています。

岩本 超電導でよく問題にされますのは信頼性で、特にヘリウム冷却機の問題です。

小型冷却機はまだちょっとむずかしい問題があります。厳密に申しますと、このヘリウム冷却機が液化機なのか、あるいは冷却機なのかということと異なります。液化機だとしますとなかなか信頼性が上がらないわけです。したがって冷凍機として使おう、それが先ほどありましたベビーシッター方式の考えです。液化機としては、たとえば数千時間の MTBM というへんをねらって開発しているわけです。そういう意味では、やはり保守点検の問題はヘリウム液化機にはつきまとう。もちろん非常に大型の液化機はかなり信頼性があるというデータもずいぶん出ているわけで、いま申し上げたのは、この程度の非常に小さなヘリウム液化機です。ヘリウム冷凍機としては、非常に信頼性が高い例もあります。

的崎 この討議の論点についての問題ですが、超電導は将来をポイントに置き、常電導は現在をポイントに置いておるように思います。常電導でもコイルの構成一つをとっても、4 コイルの他に 6 コイルとかいろいろありますし、画のレベルもますます上がっていくと思います。

ハインリッヒ 冷凍機と再液化機の信頼性について簡単にコメントしたいのですが、小型冷凍機は比較的信頼性が高く、ある工場では 5 年半連続無事故運転を行なっています。もっとも半年に一回の定期点検はやるのですが、再液化機は、ジュールトムソン弁の問題等がある信頼性は小型のシールド冷却用冷凍機よりは今のところ劣る

ようです。今両者を検討中ですから、そのうちデータが出て来ると思いますが、私としてはコストのことも考えて小型冷凍機の方がよいように感じています。

亀井（司会） 時間の方が定刻になってしまいました。これで結論を出すものではありませんが、ユーザーの立場で、とにかくきれいな、信頼できる情報が得られればいいとおっしゃった佐久間先生、先ほどからこれだけ時間が経過したのですが、いままでの討論をお聞きになられて、どちらの方がいいという感想をお持ちですか。

佐久間 教科書を読むと、超電導の方がいいような話になっています。だけれども翻って考えると、今度はそれにいろいろな社会的な制約が加わってきて、もう一遍どちらがいいのかというふうになってしまう。そういうものが全部消去できて、ただ常電導か超電導かということになりますと、超電導に軍配を上げなきゃいけないような雰囲気だろうと思うんです。

本当に T_1 値を拾い出すのにどちらがいいかということ、S/N 比がよくなるということ、それらのバランスを考えたときに、どちらが勝つかまだわからないということになると思います。

だけれども、いままでの話ですと、機械が安全であれば、何となく超電導がいいような雰囲気ですね。

亀井（司会） いま佐久間先生のお話のように、正しい T_1 を得るには一体どのくらいがいいのか、やはり飽和現象の問題等もありまして、得られた情報を最後に演算処理だけで、何か適当な処理をした後できれいな像になったとしても、それが真のものを与えているとは必ずしも考えられないわけです。

そういった意味で、高周波という立場から考えた場合には、一体どのくらいが有利かというところを、どなたか発言していただけないか。

的崎 常電導派で終わっては困るので、イコールにしておくためにいいですけども、1,200

Gauss で 5 MHz です。さっきからの議論のように、skin effect がどれだけ効くか、それから磁界の強さで感度は上がってまいります。それとのポイントはどこにあるかということですが、5 MHz より、予想よりもっと高いところにあったというのが私どもの実感です。skin effect は 10 MHz 近くでも、思ったほどは効かなかったという感じです。ですから、常電導、超電導は別にしまして、もう少し上げた方がいいかもしれません。

亀井（司会） IEEE Trans. のどなたかが試算していますが、10 MHz までほとんど平だったと思います。10 MHz ですと 0.25 T になります。私は中立的立場にいてはいけないうのでしょうけれども、そうするとまた答が超電導の方になってしまう。

的崎 臨床の先生方にお伺いしたいのですが、やはり空間分離能を大切にされるのでしょうか。濃度分解能とか T_1 , T_2 , それからほかのいろいろな要素がございますが、先ほどからの議論は全部空間分解能がよければよしということで終わりそうなので、一言だけ質問させていただきます。

佐久間 プロントの T_1 が本当に臨床的にどのくらいの情報を与えるかということが、いまのところまだわかっていないように思うわけです。ですから、かなりたくさんの症例を集めてみないと、画の方はわからないだろう。ただ NMR の利用法というのは、画を出すことだけではなくてまだいくらかもある。だから、将来そういう方に話がいくだらうから役に立つだろうと思っているのです。

もし、画を出すだけなら、いまいろいろやっているものよりすぐれている点は、そう多くはないだろうと思うんです。ということは、愁訴を持った患者さんというのは、意外に進んだ患者さんが多いのです。集団検診の方法が十分確立していないために、もっと早い時期の患者さんが、なかなかわれわれの前にきてくれないわけです。症

期の遅い患者さんの場合には、ちょっとやそつとのよさなんかではほとんど差が出てこない。従来の診断技術、問診とか、触診なんかでもわかるような患者さんがたくさんいる。そうすると、ここで少しぐらい画がよくなっても、大勢に影響はないかということにもなりかねない。だから、画だけだったらもう一遍問い直してみる必要がある。

本題から離れますけれども、NMR で臓器の血流量が従来よりもっと正確にわかるとすると、これは診断上重要なことで、その後どのような手術、治療をした方がいいかということにまで影響していくわけです。これはずいぶん effective です。ですから診断の accuracy のほかに、もうひとつはやはり efficacy まで考えておかないといけないので、いま急に答は出したくないというのが私の感じです。

亀井（司会） 超電導か常電導かというのは、考え方によっては全く本質的でないかもしれませんが。そういうことについて、どちらの立場をとられますかということを、話題を投げかけて討論していただいたわけですが、やはりどちらの立場もなかなかとりにくい現状じゃないかという感じでお聞きしました。超電導と常電導それぞれの問題が、一応洗い出されただろうと解釈しております。

それからもう一つは、いま佐久間先生がおっしゃいましたけれども、NMR 画像というのは、いままでの映像法にはないような情報が正しく引き出せることが、基本的に大事だろうと思われるわけです。

そんな形で、時間も迫りましたので、私の司会はこれで終了させていただきたいと思います。

永井（司会） どうもありがとうございました。時間も過ぎましたので、大変まとまりがございましたけれども、パネルディスカッションはこれで終わらせていただきます。（拍手）