

特別講義BII「高エネルギー加速器科学」

大強度加速器を用いた
素粒子原子核実験(の裏側)入門

田中 万博



J-PARC Center
素粒子原子核ディビジョン



KEK: 高エネルギー加速器研究機構
素粒子原子核研究所

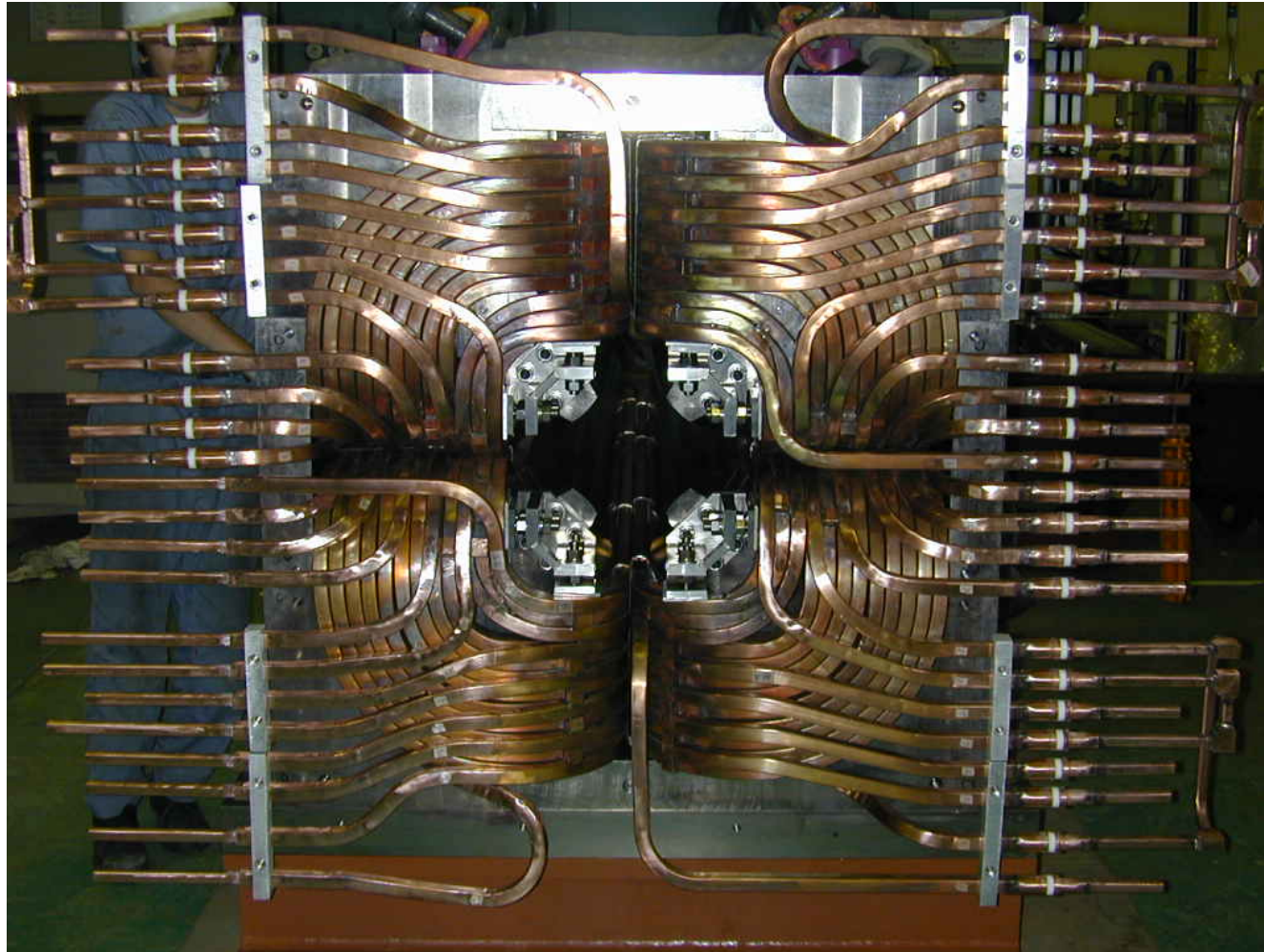
E-mail: kazuhiro.tanaka@kek.jp

磁石の造り方

今回話すこと

- 大強度加速器J-PARCの概要とハドロン実験施設の建設
- ビーム輸送とビーム光学
- 電磁石の作り方、磁場の測り方
- ニュートリノビームを250km離れた的にあてる方法

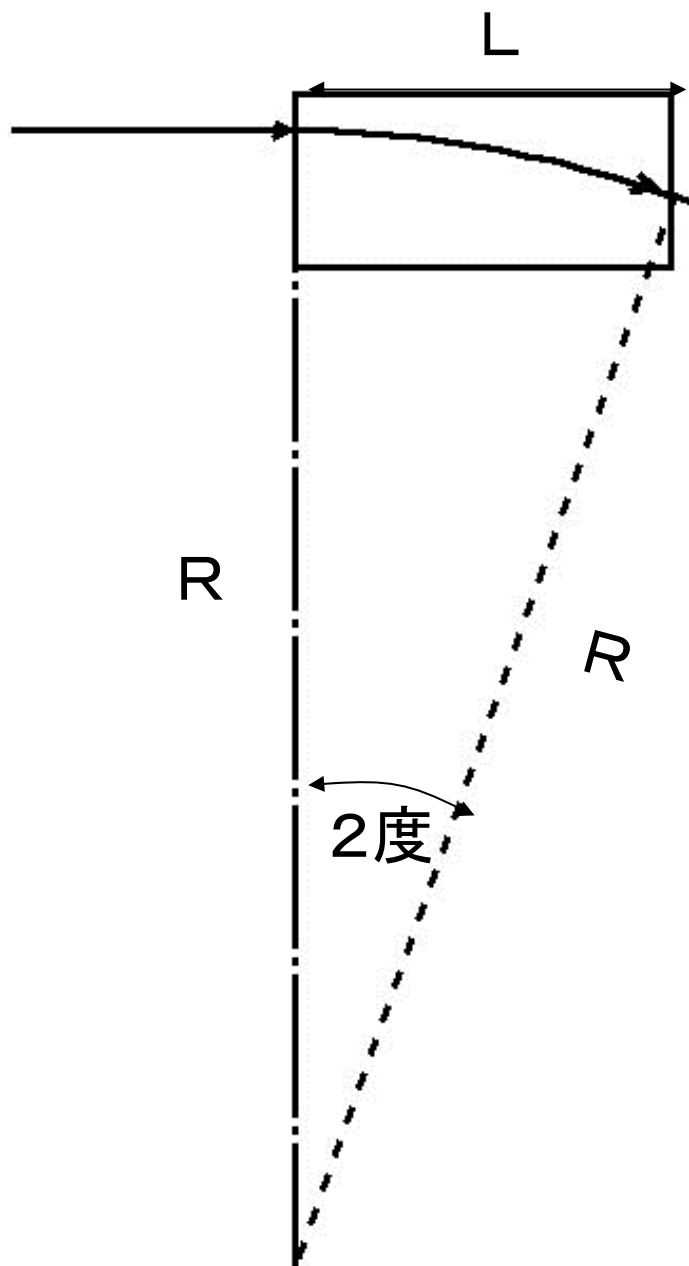
磁石の造り方



2Tの磁場と、10T/m磁場勾配の作り方

問題演習その1

- 12GeVの陽子ビームを磁極長100cmの磁石で2度(35mrad)偏向させたい。何テスラーの磁場が必要か？ただし磁場は磁極部のみに存在すると仮定する。
- 上記の磁場を10cmの磁極間隙に発生させたい。起磁力は何アンペア・ターン必要か？



$$L/R = \sin(2^\circ) \\ = 0.035$$

$$R = L/0.035, \quad L = 1\text{m}$$

よって

$$R = 28.6\text{m}$$

12GeV陽子は12.9GeV/c

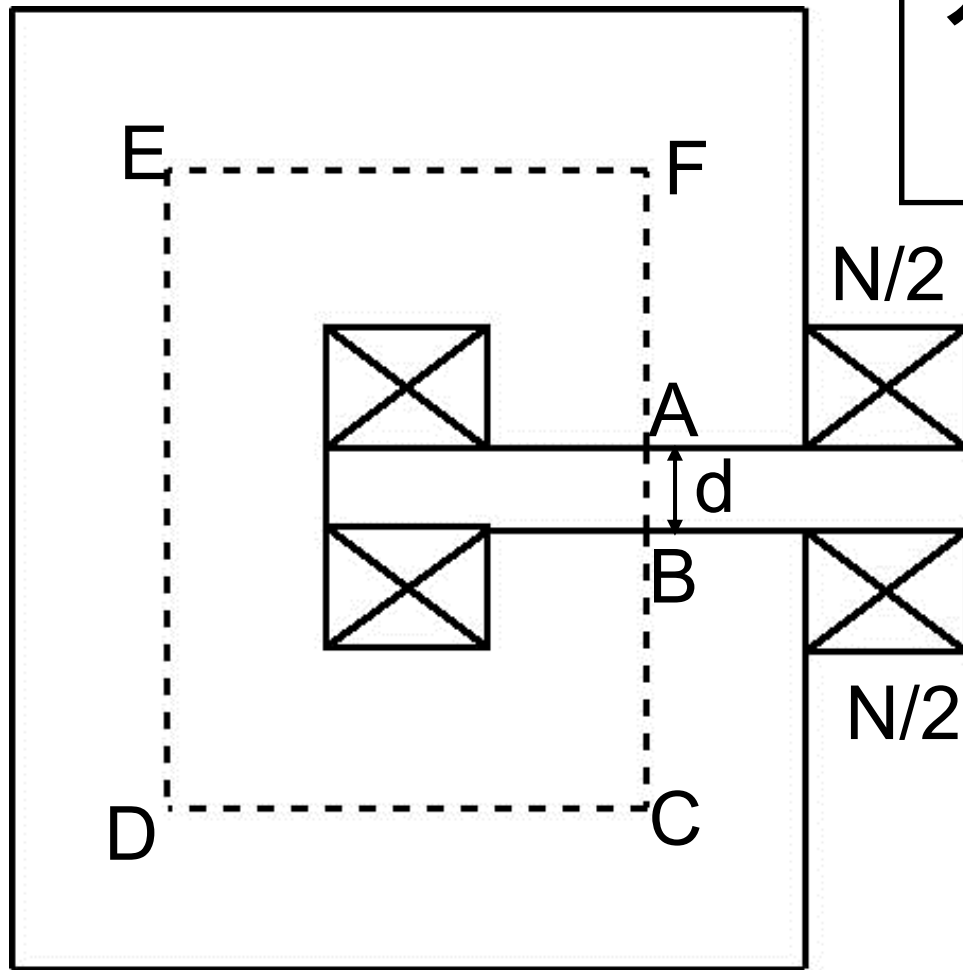
$$12.9 \div 0.3 = 43.0\text{T} \cdot \text{m}$$

よって

$$43.0 \div 28.6 = 1.50\text{Tesla}$$

アンペールの定理

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = N \cdot I$$



$$\overline{AB} = d$$

$$NI = (B/\mu_0)d + (B/\mu_0\mu_r)\overline{BCDEFA}$$

B : 磁束密度

(経路に沿って一定)

μ_0 : 真空の透磁率

μ_r : 鉄の比透磁率 $\gg 1$

よって

$$B = \mu_0 NI / d$$

では必要な起磁力は？

$$B = \mu_0 NI / d \Rightarrow NI = Bd / \mu_0$$

μ_0 : $4\pi \times 10^{-7}$ (Weber/A·m)なので、

$$NI = 1.5 \times 0.1 / 4\pi \times 10^{-7}$$

$$= 119366 \Rightarrow 120000 \text{ AT}$$

問題演習その2

余裕を見込んで、「問題演習その1」で求めた値の20%増しの起磁力のコイルを設計する。

- 電源の最大電流を1500Aとすると、ターン数はいくら必要か？

$$\begin{aligned} & 120000 \times 1.2 / 1500 \\ & = 96 \text{ ターン} \\ & = 48 \text{ ターン} / \text{極} \end{aligned}$$

コイル設計

- コイル設計とは、何を設計することか？
 - 必要な起磁力を許容される温度上昇の範囲内で実現すること。
- コイル→銅線に電流を流す事
 - オーム発熱をいかにして除熱するか？
- 言い換えれば、1000Aの電流を流す、という事の感覚的な理解を行う！

電磁石の導体

- 主に銅。たまに純アルミニウム。
- 銅には、純度によって無酸素銅（OFC、99.96%）、
燐脱酸銅(99.90%)、タフピッチ銅(99.90%)……、
などの種類がある。磁石にはOFCを使いましょう。
- 銅線には、裸導線、ホルマル導線、有孔導線（ホ
ローコンダクタ）、などがある。大型の電磁石は水冷
するので有孔導線の裸導体を用いる事が多い。小
型磁石の場合は太めのホルマル線も便利。
- 冷却（除熱）と起磁力（発熱）のバランスをよく考え
る。

ホロコンとソリッドコン

ソリッドコン
(孔無し導体)



ホロコン
有孔導体

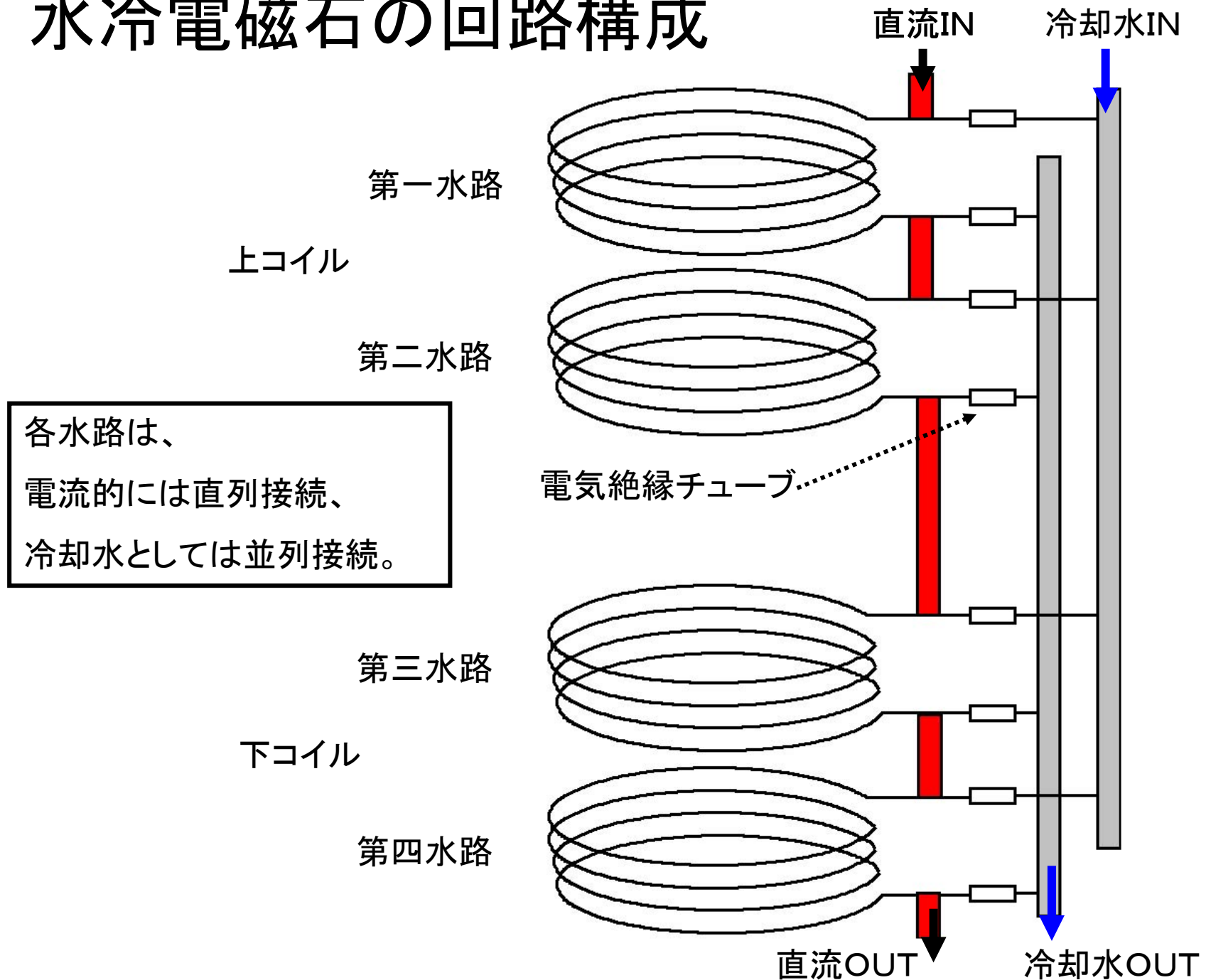


冷却水(純水)を通す
孔が全長にわたって
穿たれている

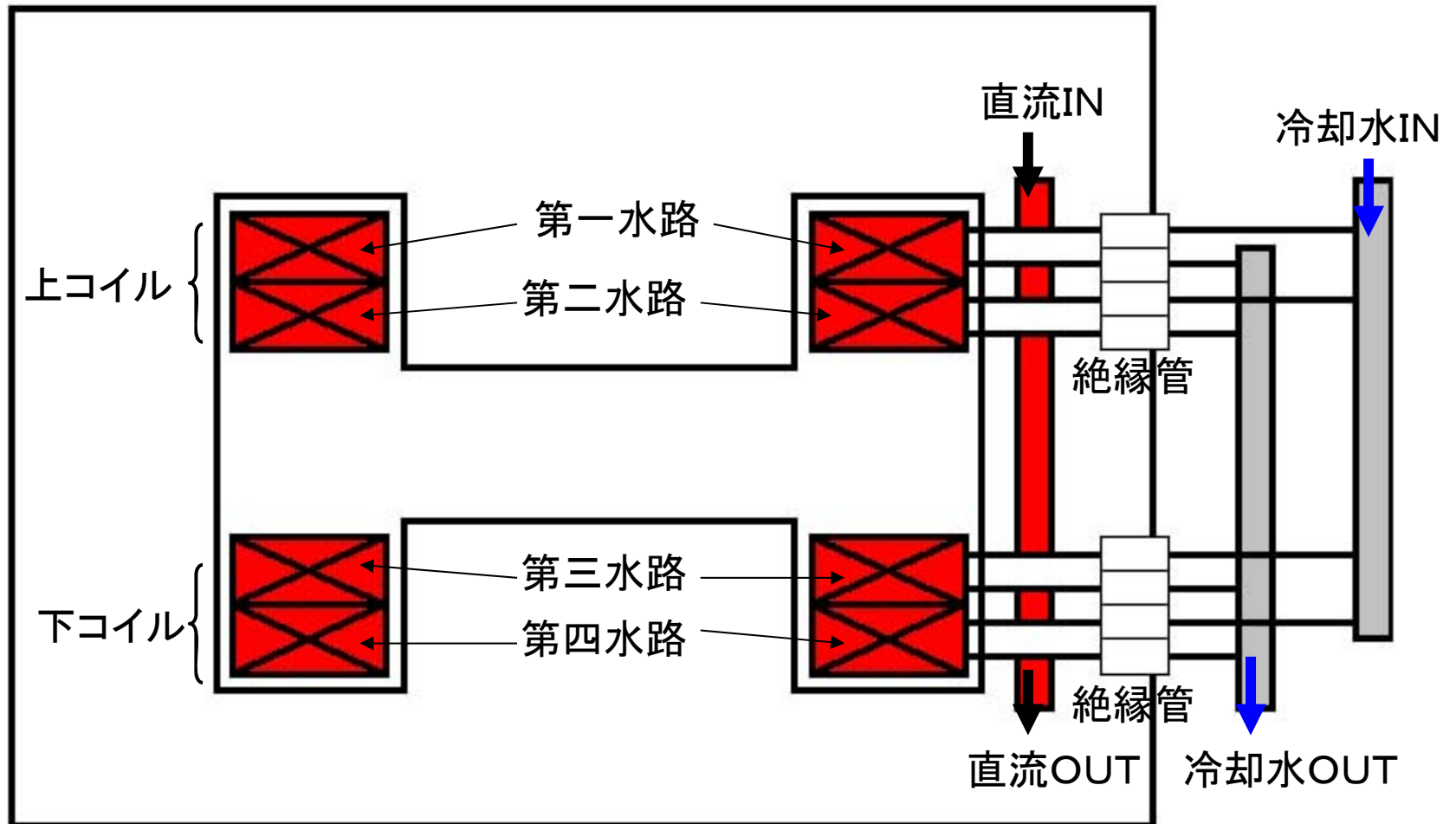
例: 16mmx16mmx60m

孔直径10mmφ

水冷電磁石の回路構成



4水路電磁石の構造(H型)



8D320型偏向電磁石



問題演習その3

「問題演習その2」で求めたターン数のコイルを設計する。まずは線材を選ぼう！

- コイル線材としてホローコンダクターを使う。
- 日立電線カタログO-963, O-1050, O-1141のホロコンでは、1水路あたり最大何メートルまで製作可能か？

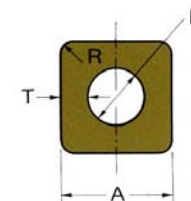
問題演習その3の続き(条件)

- 冷却水の温度上昇は最大30℃までOK。
- 冷却水の入水温は最高35℃である。
- 冷却水の圧損は10気圧とする。
- 銅は純銅(無酸素銅)である。

問題演習その2の続き(ヒント)

- 細長い水路での冷却水流量は水量(l/s)= $[穴直径(mm)]^{19/7} \times [圧損(気圧)/流路長(m)]^{4/7} \div 800$ 、という半経験式が良く合う。
- 無酸素銅の抵抗率 ρ の温度依存性は $\rho(\Omega \cdot m) = 0.0068t(^{\circ}C) + 1.55 \quad (\times 10^{-8})$ である。

問題演習その2の続き(資料)



HITACHI-NO	DIMENSIONS				Area (mm ²)	Weight (kg/m)	Length (Random) (m)	Packing form
	A	D	T	R				
H-750	65	27	19	3	3,649	32.5	2-3	Straight
H-761	60.4	31.75	14.3	3	2,851	25.4	2-3	Straight
H-762	50.8	27	11.9	3	2,005	17.8	3-4	Straight
H-773	40	20	10	3	1,278	11.4	4-5	Straight
H-934	46	22	12	4.5	1,719	15.4	4-5	Straight
H-7018	16	7	4.5	1.5	215.6	1.93	55	Coil
O-750	7.5	4.5	1.5	0.8	39.8	0.354	40	Coil
O-890	24	16	4	2	372	3.31	21	Coil
O-932	11	6	2.5	1	91.8	0.82	15	Coil
O-938	9	6	1.5	0.5	52.5	0.467	65	Coil
O-963	16	10	3	1	176.6	1.57	57	Coil
O-998	20.1	12	4.05	2	287.6	2.56	25	Coil
O-999	10.8	7	1.9	1	77.3	0.69	103	Coil
O-1013	6	4	1	1	22.6	0.202	30	Coil
O-1050	13.5	8	2.75	1	131	1.17	30	Coil
O-1059	8.5	4.5	2	1.5	54.4	0.484	80	Coil
O-1060	8.5	4	2.25	1.5	57.7	0.513	75	Coil
O-1063	13	7	3	3	122.8	1.093	25	Coil
O-1116	20	14	3	1	245.2	2.19	6-8	Straight
O-1128	38	26	6	2	884.4	7.91	6-8	Straight
O-1141	12.5	7	2.75	1	116.9	1.045	60	Coil
O-1143	14.9	6	4.45	2	190.3	1.70	21	Coil
O-1148	30	22	4	2	496.5	4.44	6-8	Straight
O-1173	8.5	5	1.75	1.5	50.7	0.453	80	Coil
O-1199	50	30	10	3	707	14.7	3-5	Straight
O-1221	15	7.5	3.75	1.5	178.9	1.60	42	Coil
O-1226	25	13	6	1	491.4	4.39	6-8	Straight
O-1255	6.4	3.2	1.6	0.6	32.6	0.291	95	Coil
O-1257	11.86	6.985	2.44	1.52	100.4	0.897	40	Coil

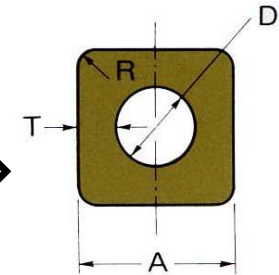
Tolerance: A, D: 1% of dimension A, D (Max. ± 0.6 mm, Min. ± 0.1 mm)
T: 10% of dimension T (Max. ± 0.6 mm, Min. ± 0.1 mm)

問題演習その2の続き(資料抜粋)

HITACHI HOLLOW CONDUCTOR

TYPE-7

日の丸管(業界用語)⇒



HITACHI-NO	DIMENSIONS				Area (mm ²)	Weight (kg/m)	Length (Random) (m)	Packing form
	A	D	T	R				
O-963	16	10	3	1	176.6	1.57	57	Coil
							60m可能	
O-1050	13.5	8	2.75	1	131	1.17	30	Coil
							60m可能	
O-1141	12.5	7	2.75	1	116.9	1.045	60	Coil

Tolerance: A, D: 1% of dimension A, D (Max. ± 0.6 mm, Min. ± 0.1 mm)
T: 10% of dimension T (Max. ± 0.6 mm, Min. ± 0.1 mm)

手順をO-963でチェックすると・・・、

- 長さL(m)、断面積a(m²)の銅の抵抗R(Ω)は、

$$R = \rho L / a$$

O-963はa=176.6mm²、これが長さ40mの時、

$$R = (0.0068(35+30 \div 2) + 1.55) \times 10^{-8} \times 40 \\ \div 176.6 \times 10^{-6}$$

$$= 4.28 \times 10^{-3} \Omega = 4.28 \text{m}\Omega$$

- 冷却水の入水温35°C、温度上昇30°Cを仮定した。

手順をO-963でチェックすると・・・、(続き)

- 40mのO-963に流れる水量(l/s)は
[穴直径(mm)]^{19/7} × [圧損(気圧)/流路長(m)]^{4/7}
÷ 800なので
 $10^{19/7} \times [10/40]^{4/7} \div 800 = 0.293(\text{l/s})$
- この水の水温が30℃上昇する事によって
持ち去れるパワーは
 $0.293 \times 30 \times 4.186 = 36.8\text{kW}$

手順をO-963でチェックすると・・・、(続き)

- 電気抵抗とパワーが決まったので、
電力(パワー) = 電圧 × 電流 = 抵抗 × 電流²
電流 = (電力 ÷ 抵抗)^{1/2}
= (36800 ÷ 0.00428)^{1/2}
= 2932A (この時、電圧は12.55V)
- ケーブルの長さを増やすと、
抵抗が増えて、パワーが減るので、電流が減る。
- それが1500Aになるのは？ ⇒ 表計算

表計算の結果は・・・、

- O-963 (16mm角)
92m、15.2V(1500A)、22.7kW
- O-1050 (13.5mm角)
52m、11.5V(1500A)、17.3kW
- O-1141 (12.5mm角)
38m、9.50V(1500A)、14.4kW

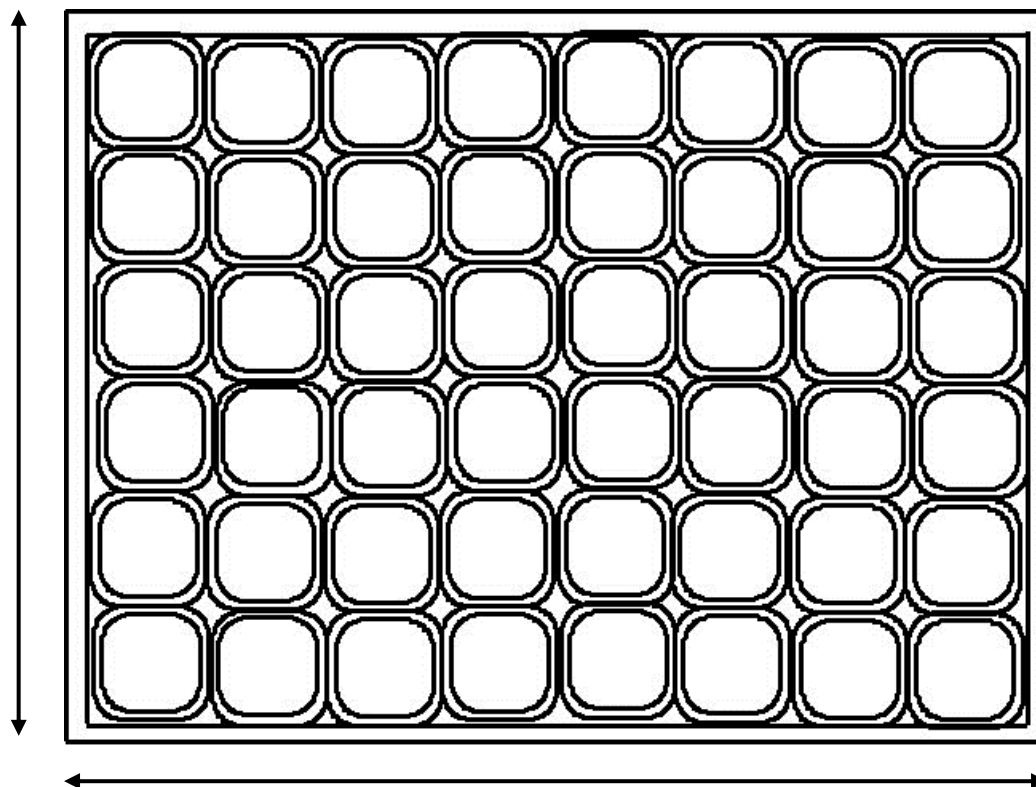
いよいよ コイル設計

コイル断面の例⇒
6層8列

$$(12.5+0.5 \times 2) \times 6 + 2 \times 2 = 85$$

$$(13.5+0.5 \times 2) \times 6 + 2 \times 2 = 91$$

$$(16+0.5 \times 2) \times 6 + 2 \times 2 = 106$$



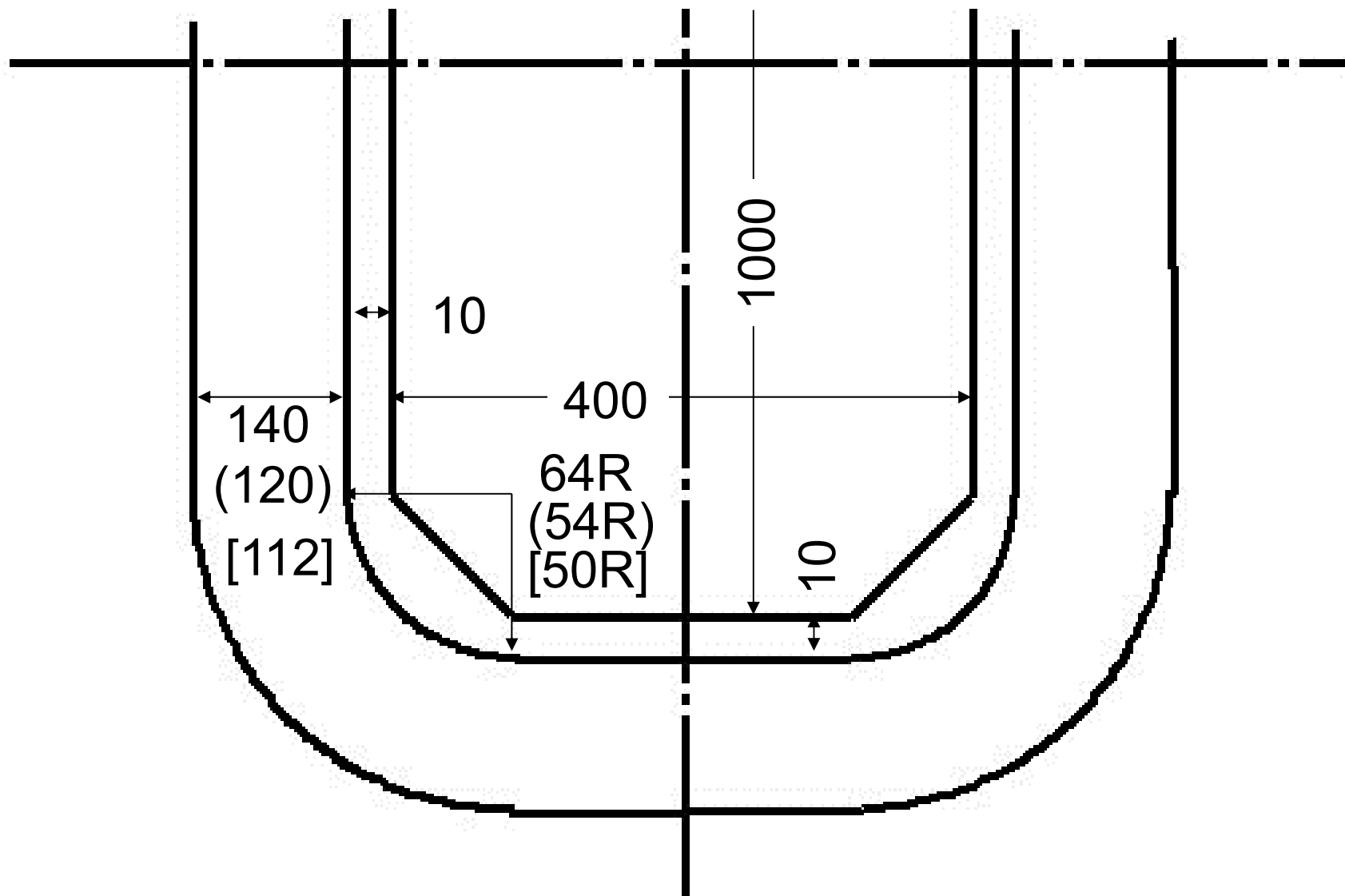
- 磁極幅は40cm
- 素管絶縁は0.5mm
- 対地絶縁は2mm追加
- コイルと磁極間距離は10mm
- ホロコンの最小曲げ半径はホロコン厚みの4倍

$$(16+0.5 \times 2) \times 8 + 2 \times 2 = 140$$

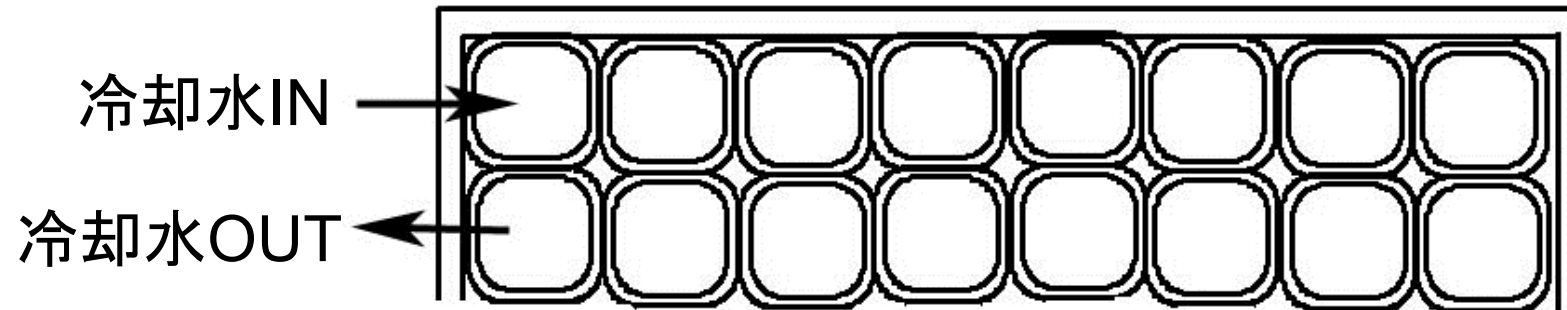
$$(13.5+0.5 \times 2) \times 8 + 2 \times 2 = 120$$

$$(12.5+0.5 \times 2) \times 8 + 2 \times 2 = 112$$

C(H)型レーストラック

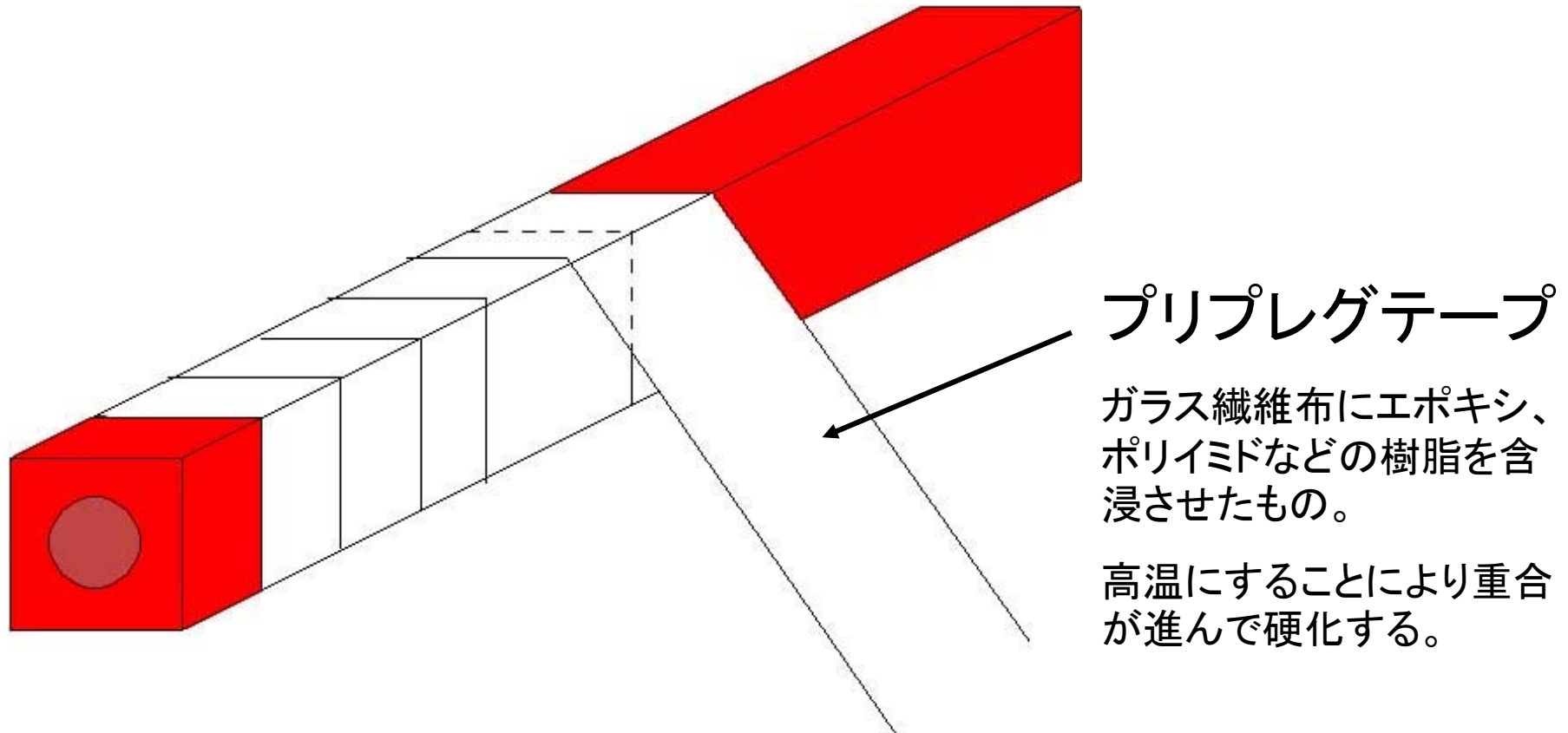


水路方式と水路長の検討



- 2層8列を1水路とすると、その長さは
 - 16mm角
$$(((1000 - 54 \times 2) + (400 - 54 \times 2)) \times 2 + (64 + 70) \times 2 \times \pi) \times 16 = 51.4\text{m}$$
 - 13.5mm角
$$(((1000 - 44 \times 2) + (400 - 44 \times 2)) \times 2 + (54 + 60) \times 2 \times \pi) \times 16 = 50.7\text{m}$$
 - 12.5mm角
$$(((1000 - 40 \times 2) + (400 - 40 \times 2)) \times 2 + (50 + 56) \times 2 \times \pi) \times 16 = 50.4\text{m}$$
- 16mm角と13.5mm角が使える！

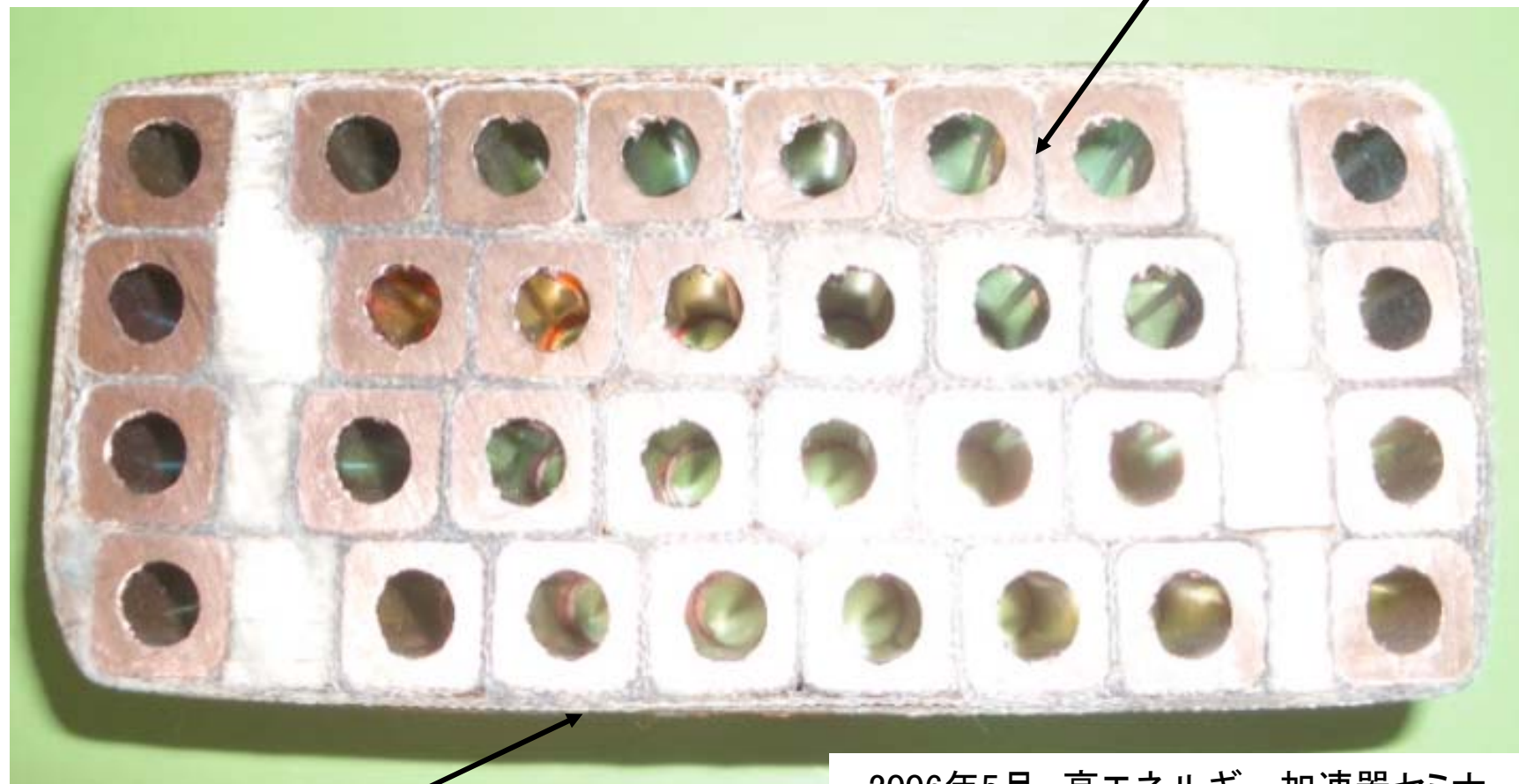
素管絶縁：ハーフラップテーピング



通常、ハーフラップによる素管絶縁を二重に行う。

これをハーフラップをダブルで！と言う。

直接水冷(ホロコン)式で作った コイル($4 \times 8 = 32$ ターン)の断面



素管絶縁層

対地絶縁層

2006年5月、高エネルギー加速器セミナー講義
(加速器研究施設、増澤美佳)より借用

最終的にはコイル全体を真空含浸して仕上げる！

全電力の評価

- 16mm角の時、
92m、15.2V(1500A)、22.7kW
 $15.2 \times (51.4 / 92) = 8.5\text{V}$ 、 6水路で51V、76.5kW以下
- 13.5mm角の時、
52m、11.5V(1500A)、17.3kW
 $11.5 \times (50.7 / 52) = 11.3\text{V}$ 、 6水路で68V、101kW以下

電気代

- 家庭用

50A契約:

基本料金1300円 + (15 - 20円)/kWh

- 工業用高圧電力B2型契約

基本料金1950円 + (8 - 10円)/kWh + 諸々

100kWの磁石を100日運転すると

$10 \times 100 \times 24 \times 100 = 24000000$ 円

こんな磁石が50台あると1.2億円/100日

磁石の値段

普通の鉄芯＋エポキシテープ絶縁＋ゴムホース

- ・ ダイポール

トンあたり80万円(～10トン以上)

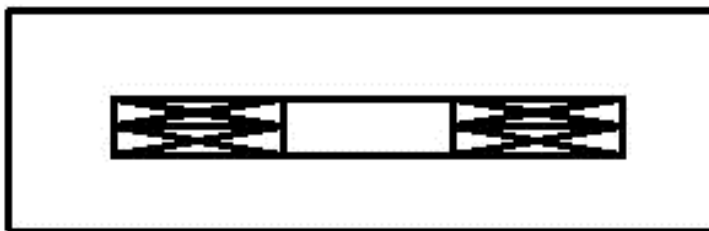
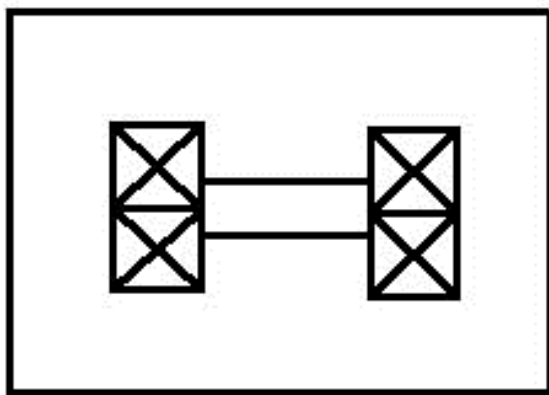
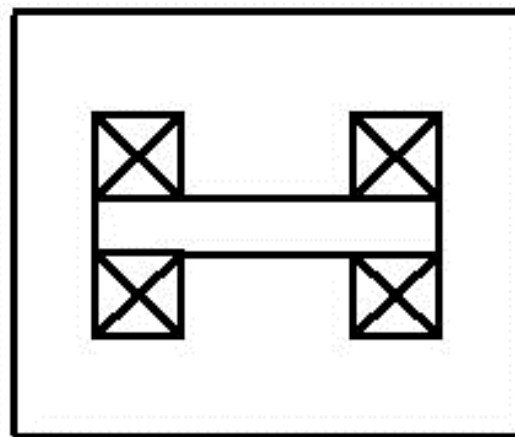
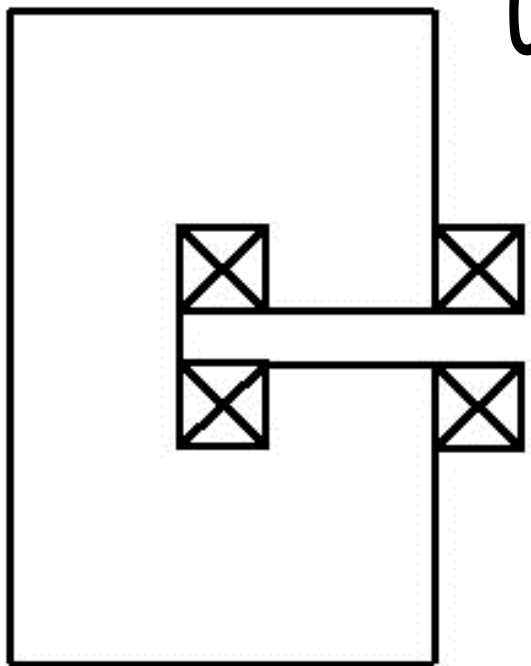
- ・ Q磁石

トンあたり100万円(～5トン以上)

ポリイミド＋セラミックスパイプ(1～2割高)

MIC(まあ倍かな？都度見積もり)

いろいろなダイポール

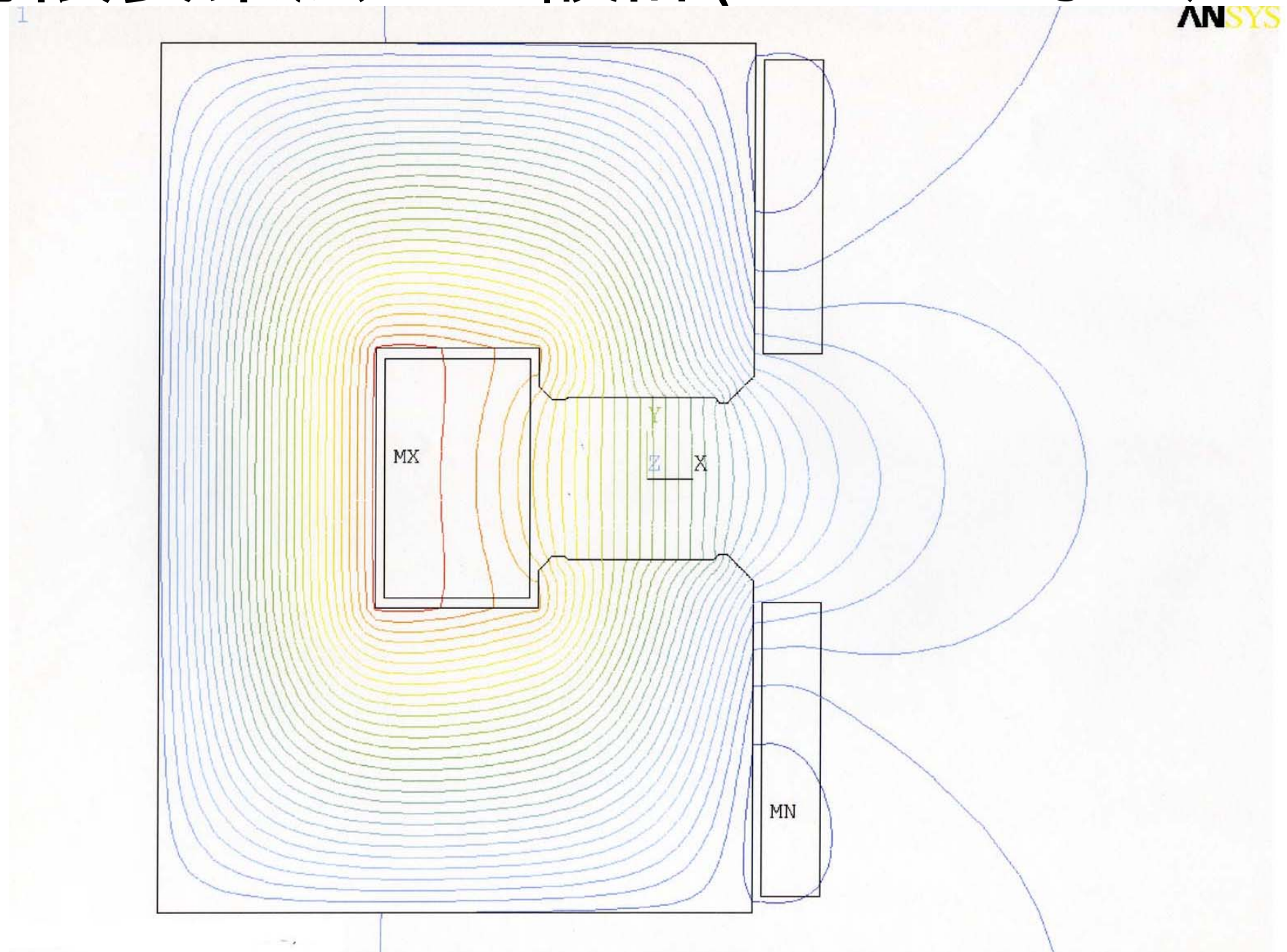


ウインドフレーム 磁石

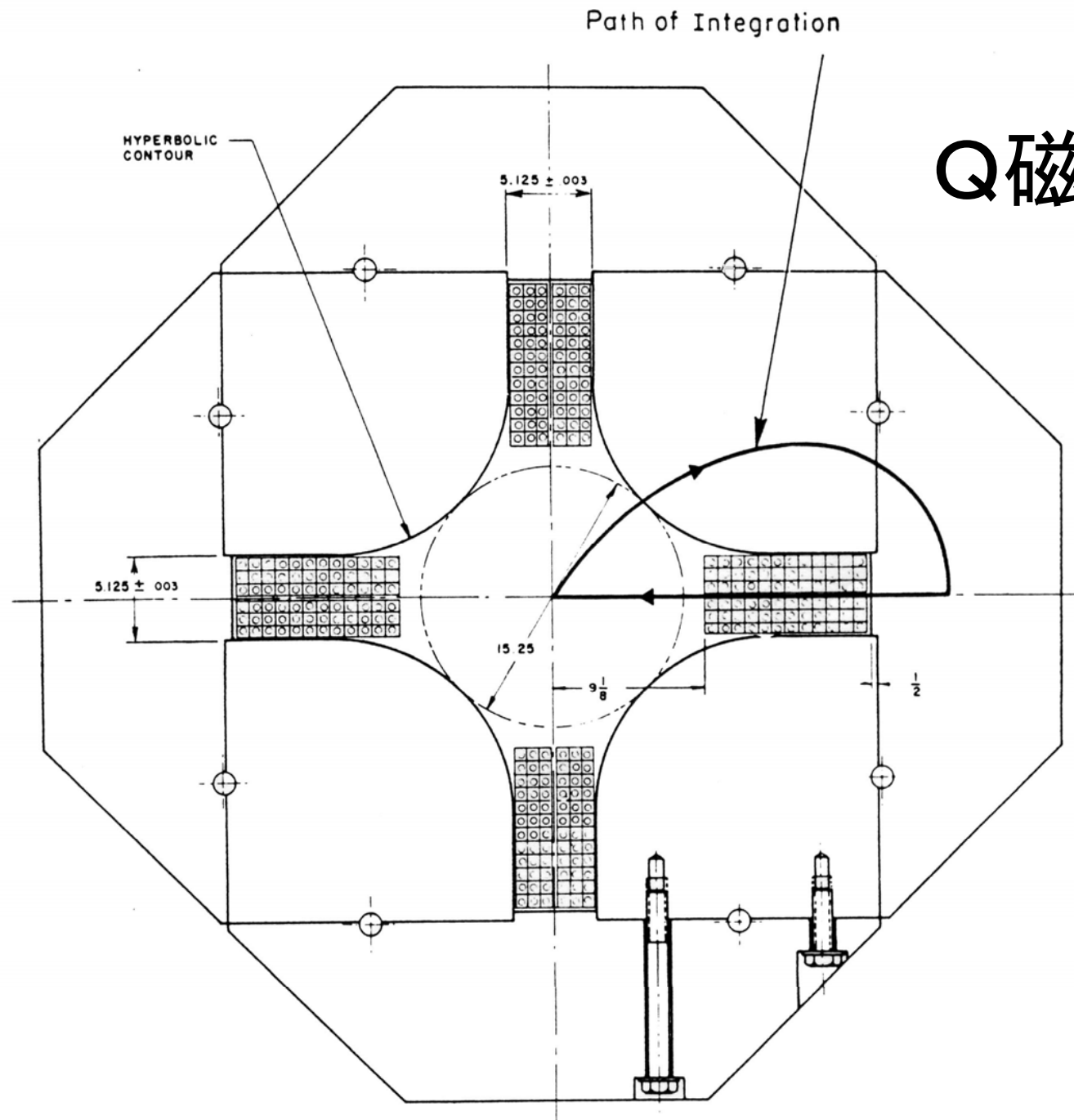
- 磁力による変形が少ない。
- 高磁場まで対称性、一様性が良い。
- 加工面数が少ない
- コイル面積が少ない。
- 磁極間隙へのアクセスが悪い。



有限要素法での設計(ANSYSなど)



Q磁石の場合



アンペールの定理再び

$$\bigcirc \int \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = N \cdot I$$

$$NI = (1/\mu_0) \int B(r) dr + [\text{Iron Path}] +$$

[Path $\perp$ to the field]

$B(r) = Kr$ とすると

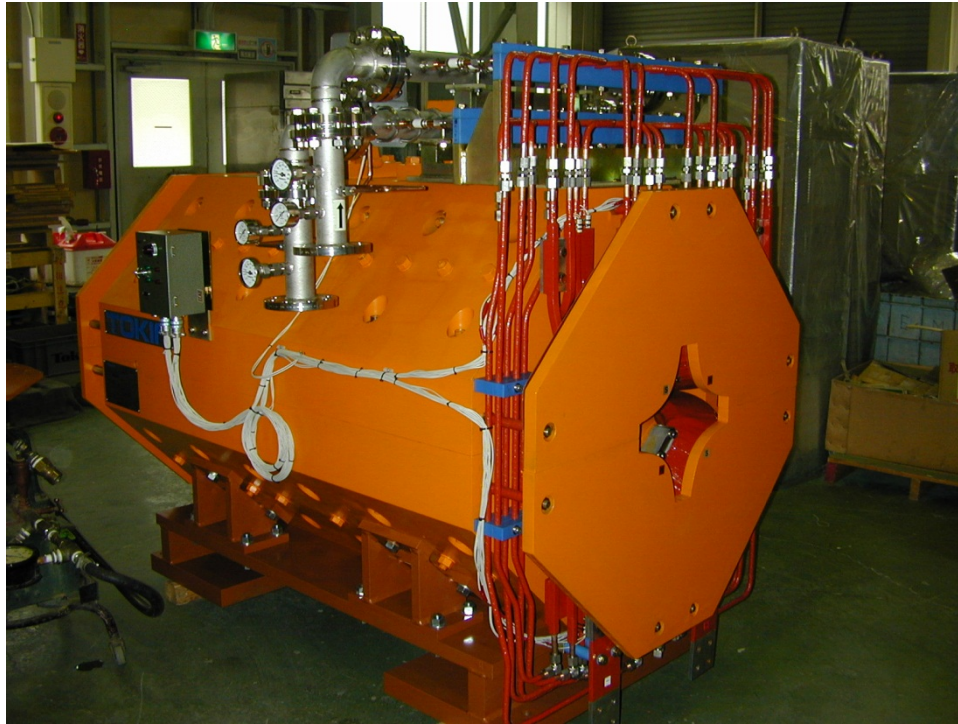
$$NI/\text{極} = K \cdot a^2 / 2\mu_0$$
$$= B_{\text{pole}} (\text{Weber/m}^2) \cdot a(\text{m}) / 2\mu_0$$

a : Bore Radius

$B_{\text{pole}} 1 (\text{Weber/m}^2) = 1 \text{ Tesla}$, $a = 0.1 \text{ m}$ の時、

$$NI/\text{極} = 1 \cdot 0.1 / 2 (4\pi \times 10^{-7})$$
$$= 397887 = 400000 \text{ AT} / \text{極}$$

本物のQ磁石



- Q430型
- 磁極長1500mm
- ボア半径100mm



参考文献

AIP CONFERENCE PROCEEDINGS 153

PHYSICS OF PARTICLE ACCELERATORS

Volume 2, p1120~1227, G.E. Fischer,

IRON DOMINATED MAGNETS

高エネルギー加速器セミナーOHO'84

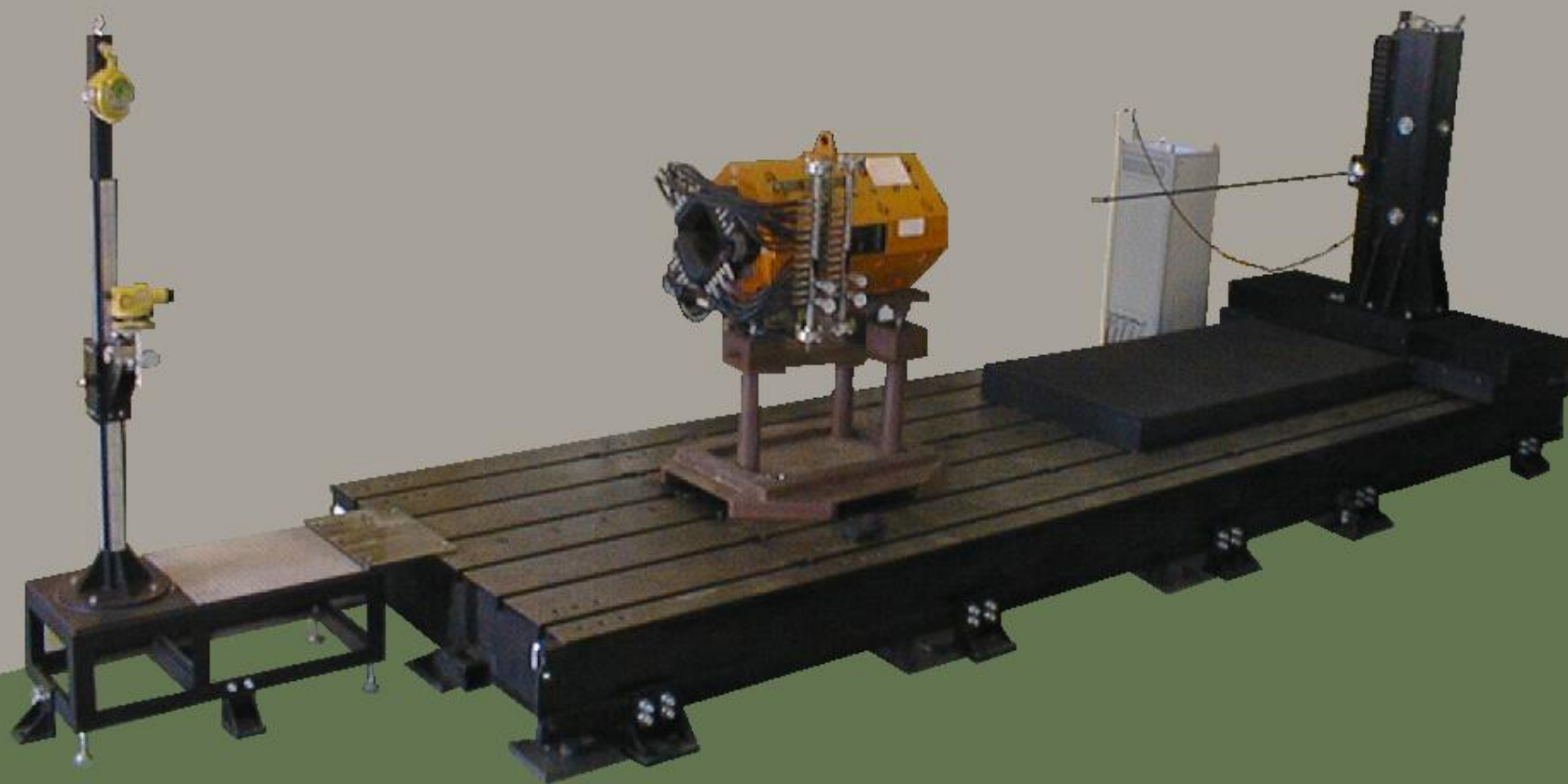
熊谷教孝、 高エネルギー加速器用電磁石

磁場測定

磁場測定

- ダイポール：NMRで高精度測定
ただし一様性が 10^{-4} 以上は必要。
高価。1セット100万円くらい。
- Q磁石：ホール素子
NMRで校正が必要（正負両方向に）。
出力の温度依存性大きい（GaAsで -0.06%
／ $^{\circ}\text{C}$ くらい）。
安い。1個50－200円くらい。

BCG磁場測定器



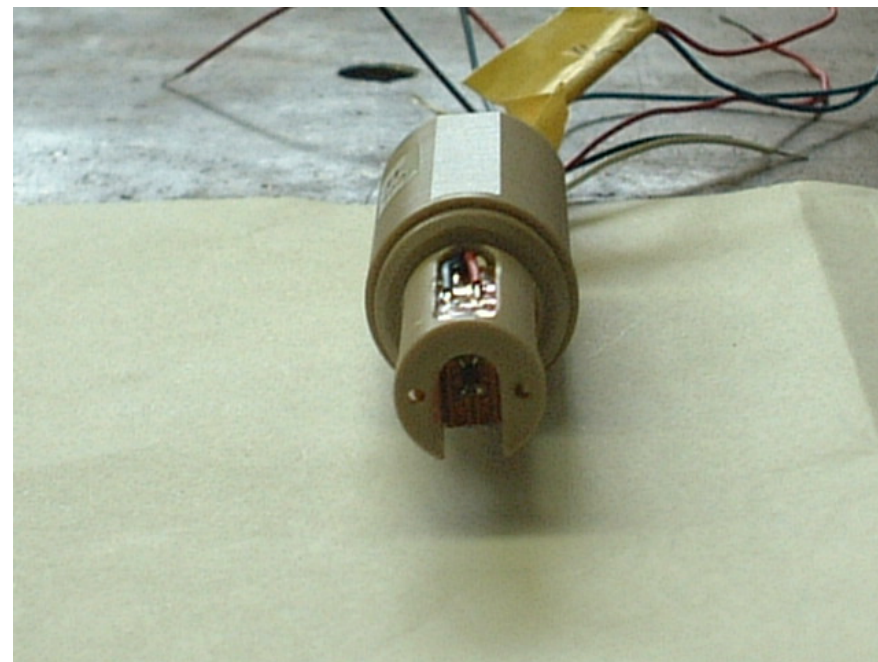
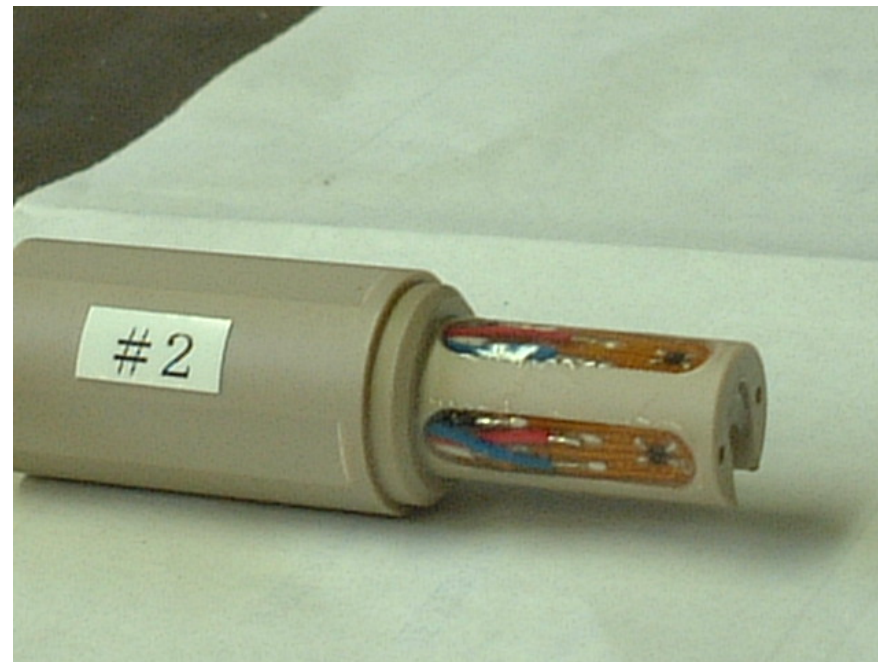
磁場測定器



三軸ホールセンサ ユニット

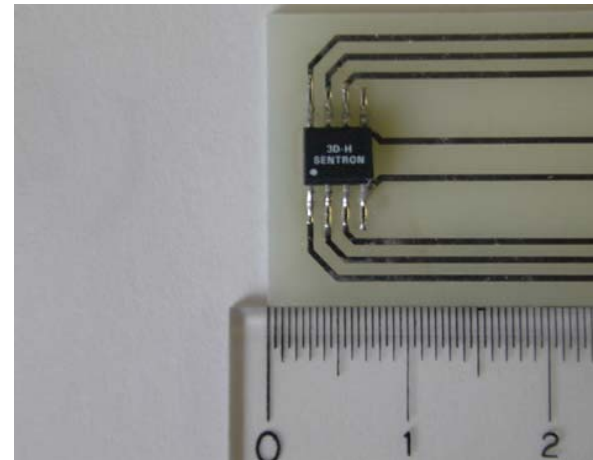
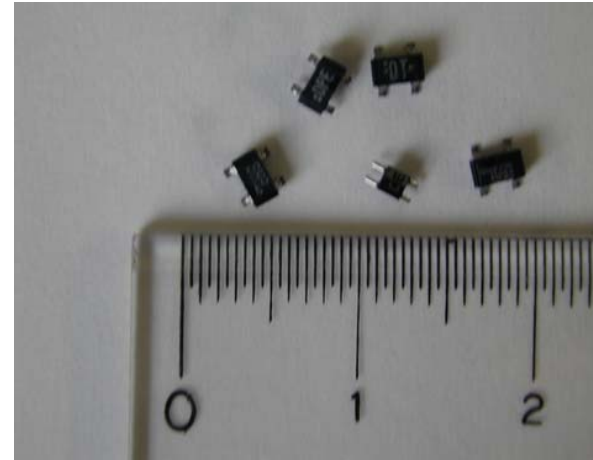


産業用ホール素子の利用で安価な三
軸磁場測定システムを構築。白金測温
体とヒーターを内蔵。温度安定性は
0.1℃以内。



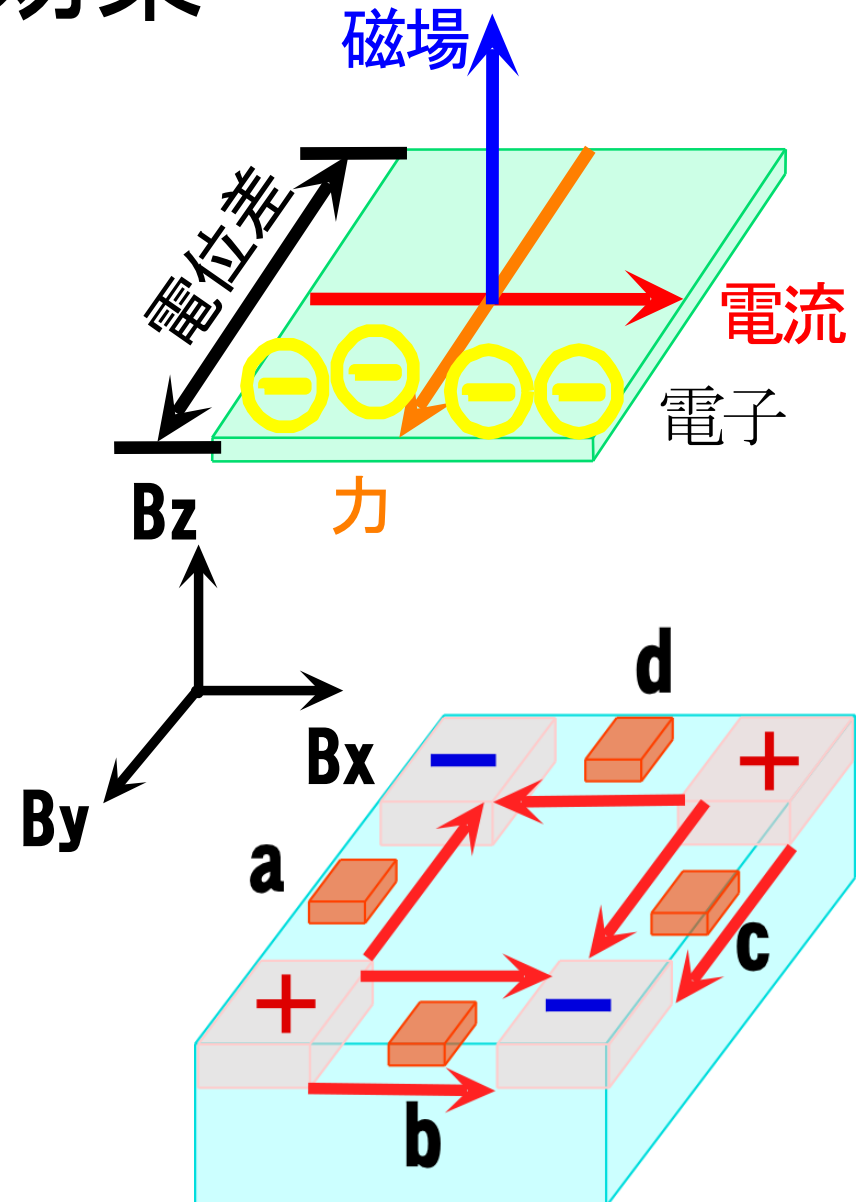
市販品ホール素子の性能評価

- 要求される性能
 - 磁場0～2.5Teslaでの直線性1%以下の精度
 - 温度係数が小さい
 - 製作性
 - 安価
 - 手に入りやすい
- BELL製(現行)
- National製(上図)
- 旭化成製
- GMW製(下図)



ホール効果

- 電流が流れている板に垂直に磁場をかけると、電流、磁場と直交する方向に電位差が現れる現象。
- GMW製素子の場合、
 - $V_x = V_a - V_c$
 - $V_y = V_d - V_b$
 - $V_z = (V_a - V_b + V_c - V_d)/2$

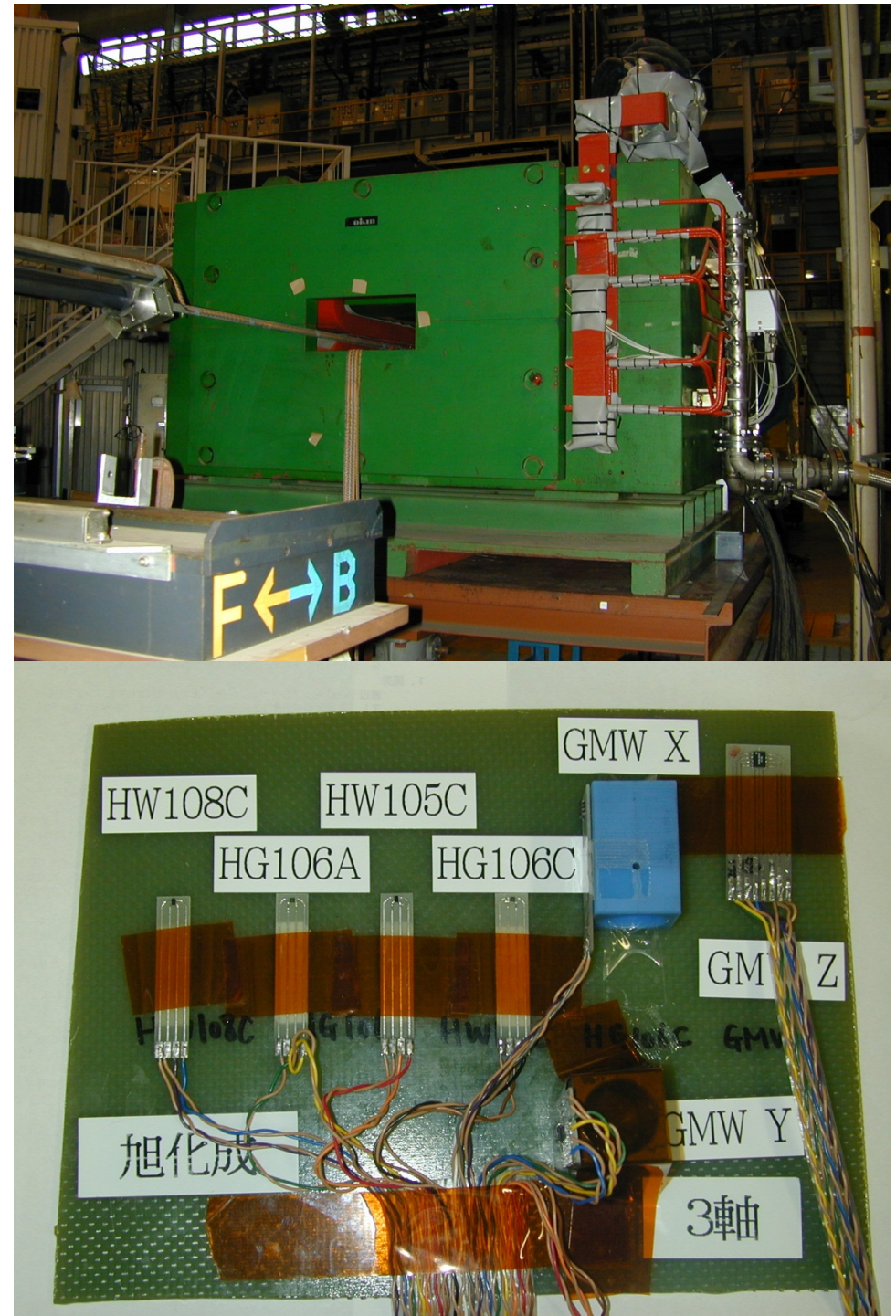


市販品ホール素子の電気的特性

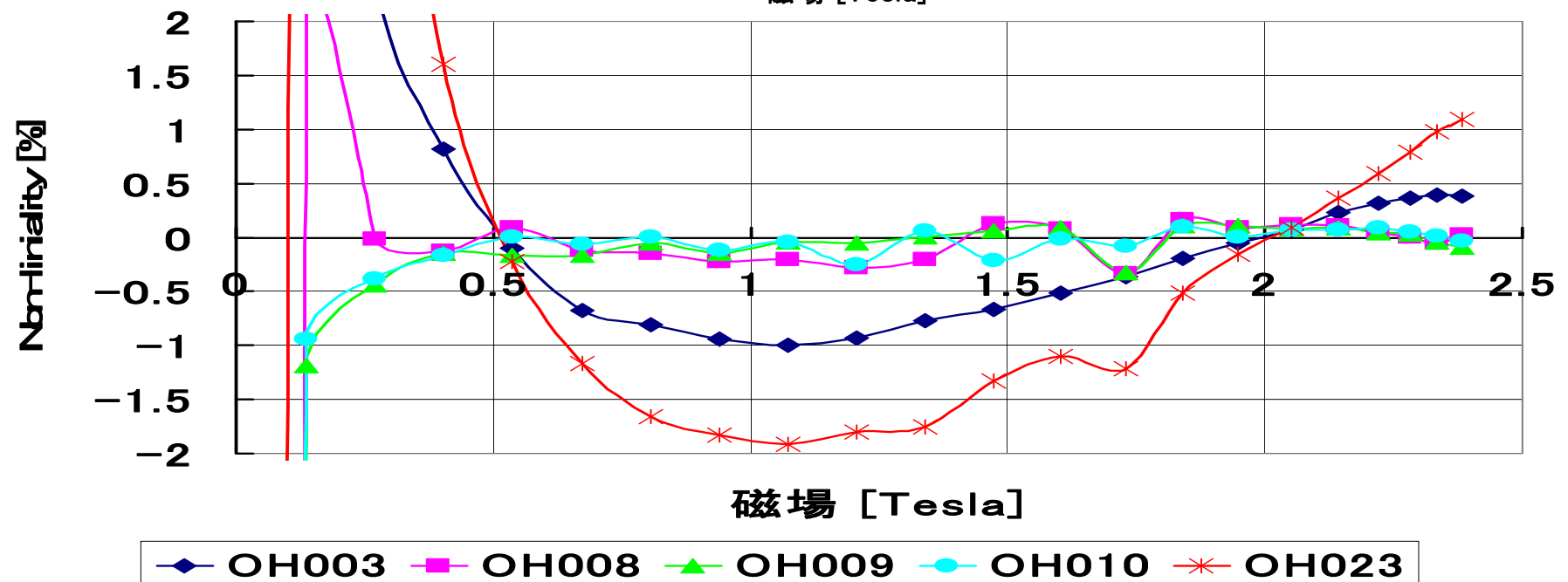
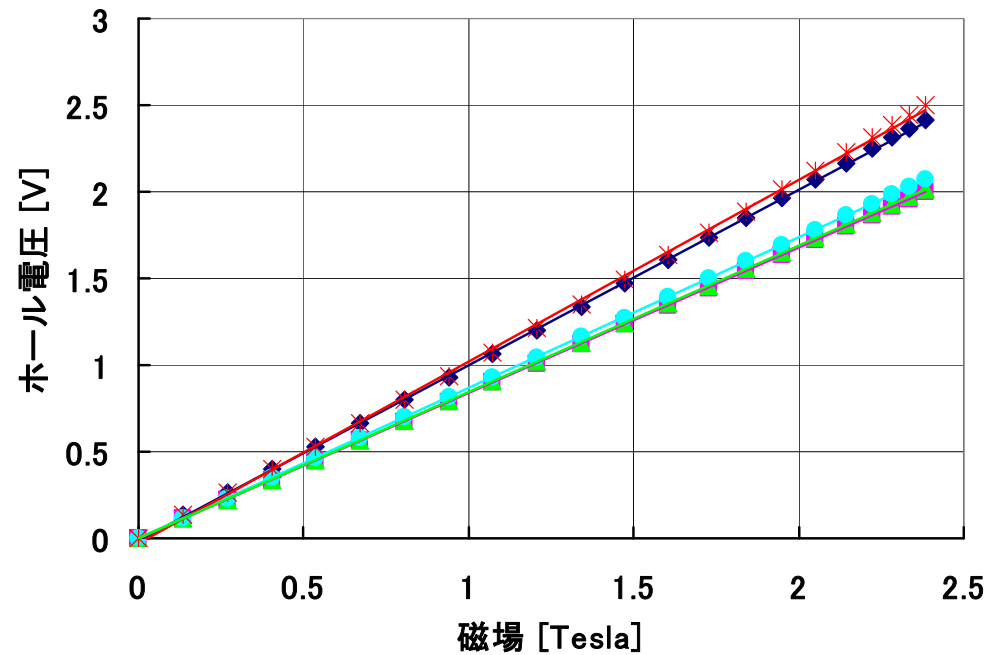
メーカー	モデル	材質	運転電流 [mA]	ホール電圧の 温度係数 [%/℃]	ホール電圧 [mV/0.1Tesla]
F.W. BELL	BH-703	InAs	100	-0.04	10
National	OH003	GaAs	6	-0.06	150
	OH008				105
	OH009				
	OH010				
	OH023		1.5		90
旭化成	HW105C	InSb	5	-1.8	175
	HW108C	GaAs		-0.06	170
	HG106A				130
	HG106C				
GMW	3D-H-30-C	Si	3		0.1

測定方法

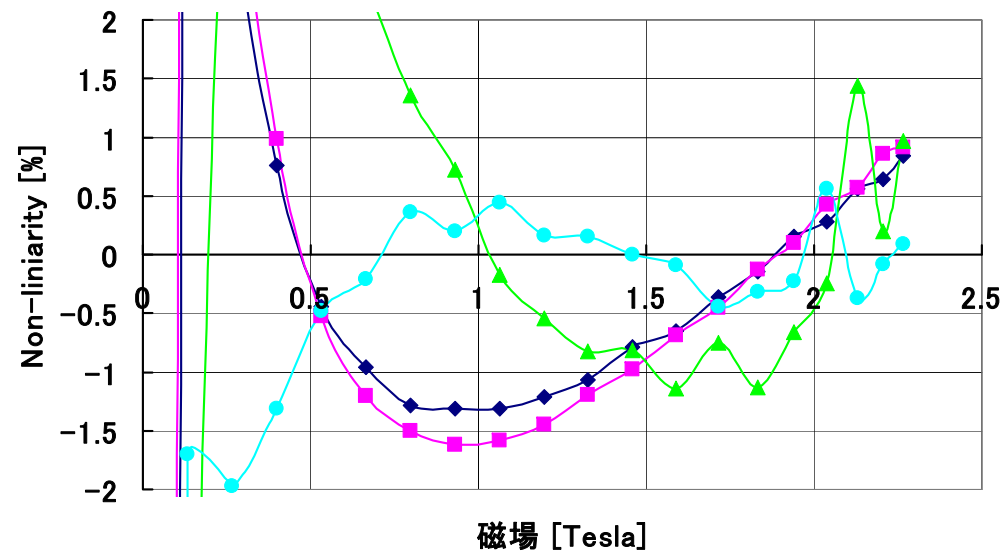
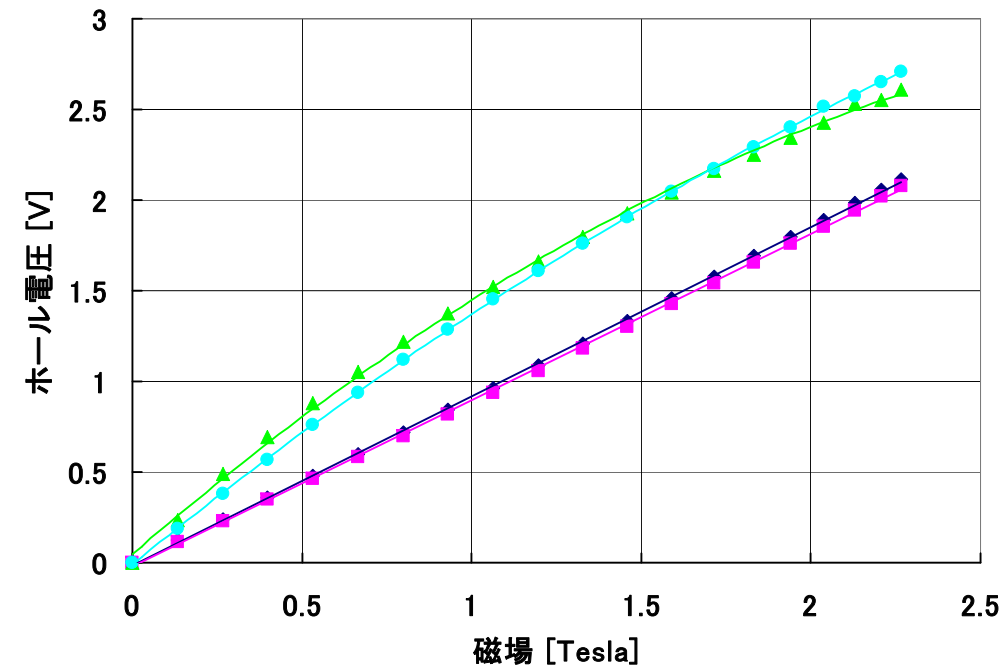
- 上図: 測定に使用したダイポール電磁石
- 最大磁場: 2.4 Tesla
- 電磁石電源安定度: 10^{-4} 以下
- 下図: セットされたそれぞれのホール素子
- 磁場の絶対値はNMRで測定
- ホール素子に電流を供給する標準電流源の電流安定度: $\pm 0.02\%$
- 読み出し: デジタルボルトメータ



National製ホール素子の直線性

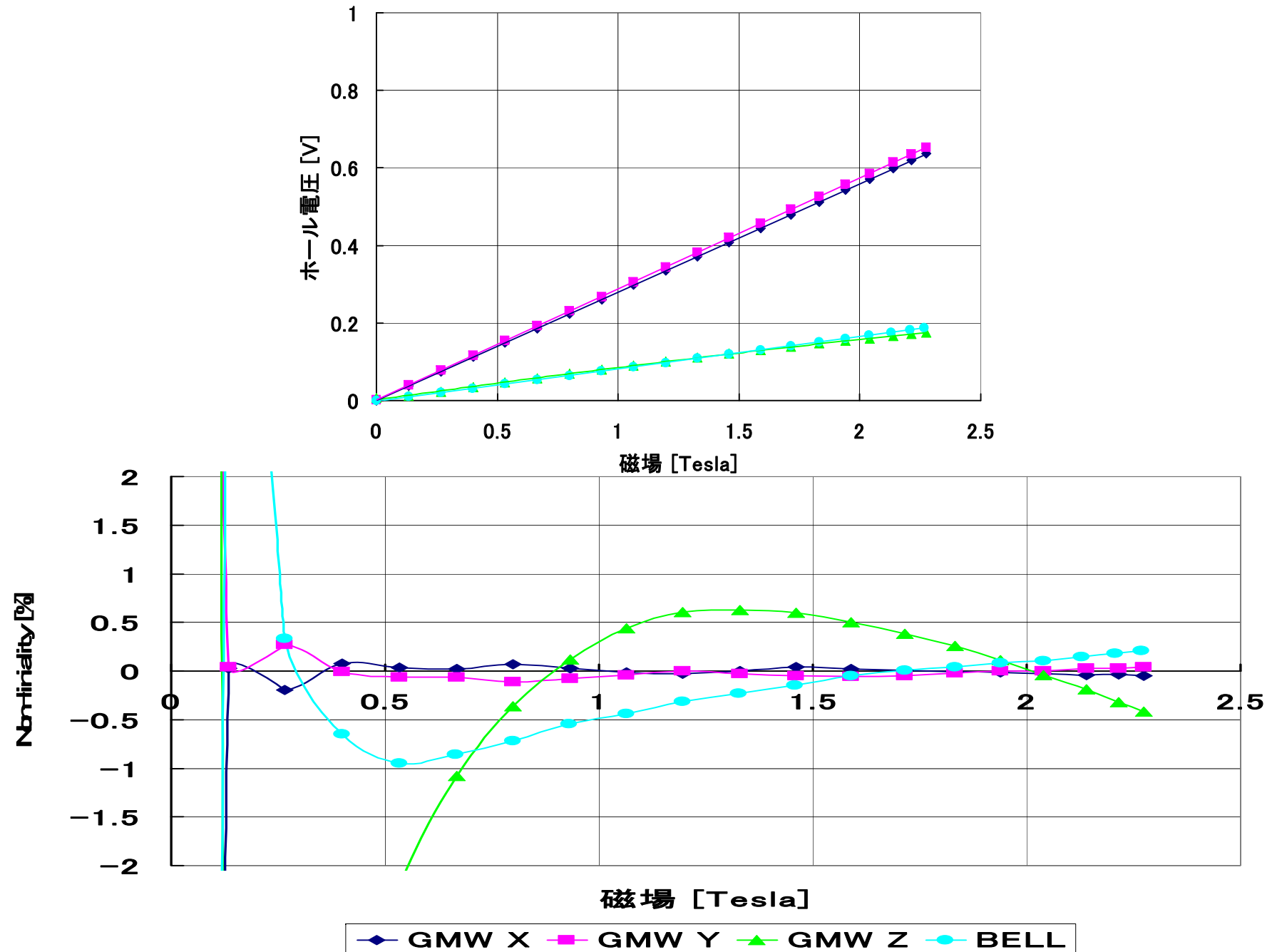


旭化成製ホール素子の直線性



◆ HG106A ■ HG106C ▲ HW108C ● HW105C

GMW製、BELL製ホール素子の直線性



性能まとめ

メーカー	モデル	運転電流 [mA]	ホール電圧 [V/2Tesla]	直線性[%]	値段 /1個	用途
F.W. BELL	BH-703	100	0.15	±1	24万 円	
National	OH003	6	2	±2	100円	精密 測定
	OH008		1.7	±0.5		
	OH009					
	OH010					
	OH023	1.5	2	±2		携帯 用
旭化成	HW105C	5	2.5	±2(注:2 次関数)	0円	
	HW108C					
	HG106A		1.8	±2		
	HG106C					
GMW	3D-H-30-C	3	X, Y : 0.6 Z : 0.15	X, Y : ±0.3 Z : ±1 (注:2次関 数)	300円	携帯 3軸

ほかの使い道

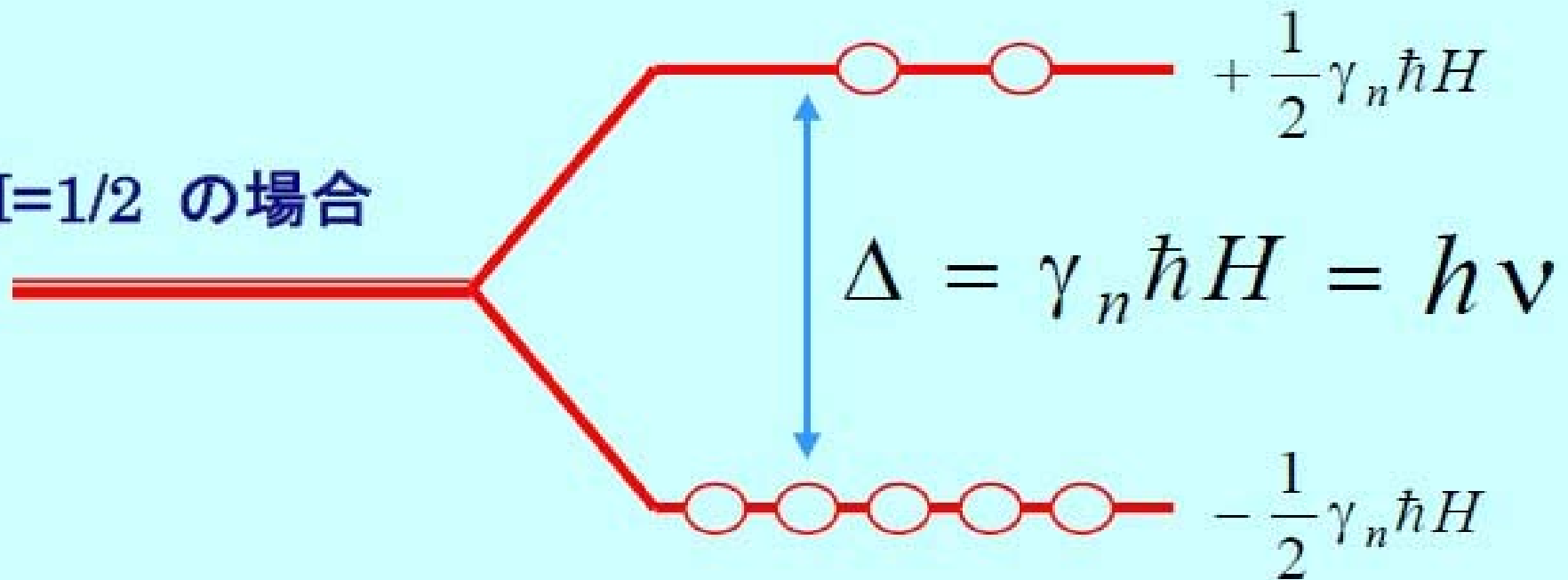
- 数%の精度なら。
- 運転電流の低い
OH023, GMW製素子
ならば、乾電池で運転
できる。
- 現場磁場測定用に、コ
ンパクトな測定器が作
れる。
- 現場で活躍中。



NMR

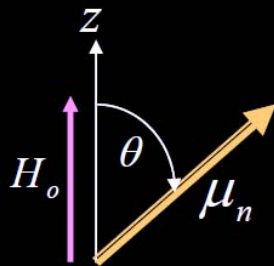
磁場中の核磁気モーメント

$I=1/2$ の場合



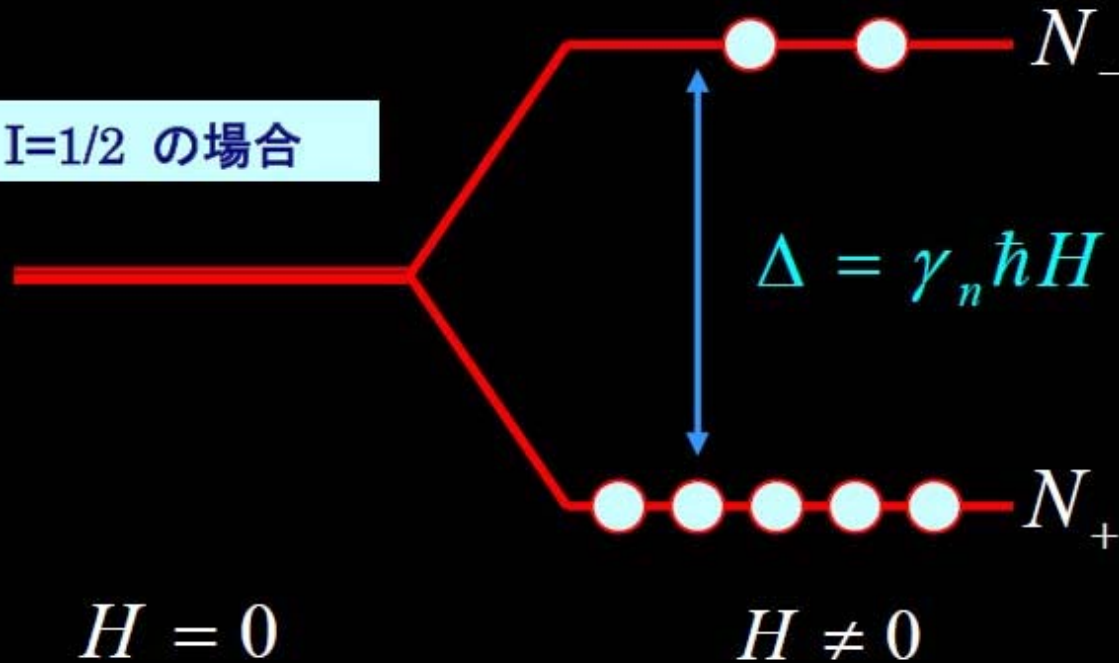
$$E = -\gamma_n\hbar\vec{I} \cdot \vec{H} = -\vec{\mu}_n \cdot \vec{H} = -\mu_n H \cos\theta$$

$$h\nu = \gamma_n\hbar H_o \rightarrow \omega_o = \gamma_n H_o$$



外部磁場にスピン平行と反平行のエネルギー準位に分裂する→ゼーマン分裂。

I=1/2 の場合



$$I_z = +\frac{1}{2}\gamma_n\hbar H$$

$$I_z = -\frac{1}{2}\gamma_n\hbar H$$

$H = 0$

$H \neq 0$

$$N = N_+ + N_-$$

$$\frac{N_+}{N_-} = \exp\left[\frac{-\Delta E}{kT}\right] = \exp\left[\frac{-\gamma_n\hbar H_o}{kT}\right]$$

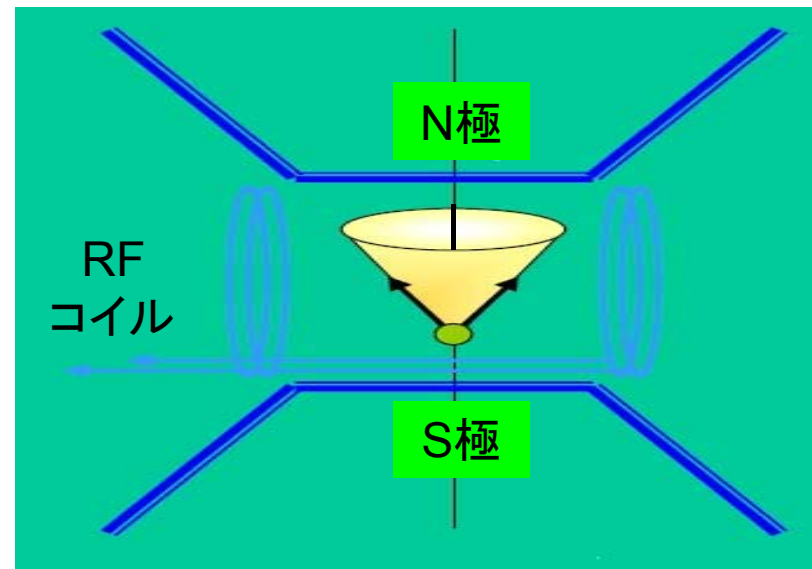
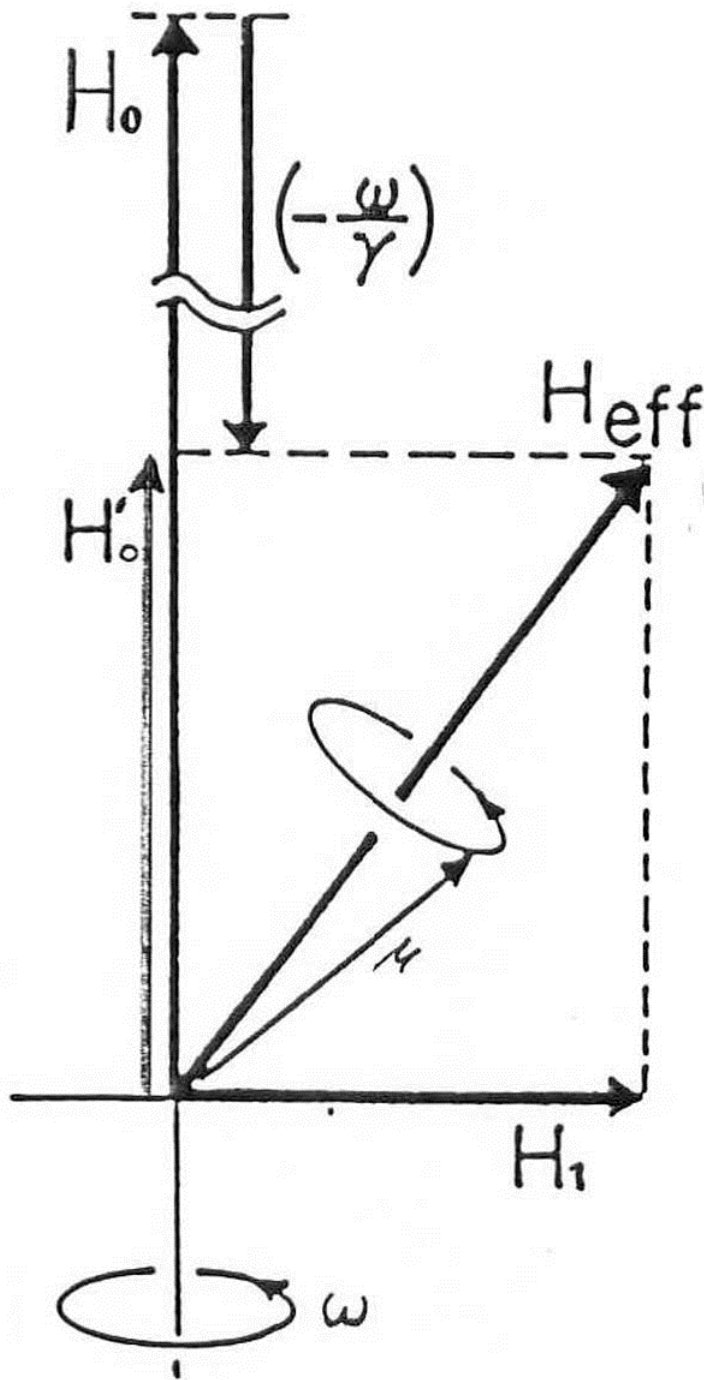
$$T \rightarrow \infty : N_+ = N_-$$

$$T \rightarrow 0 : N_+ = N, N_- = 0$$

分裂した準位間には、ボルツマン分布に従う分布差が生ずる。その結果、巨視的な磁気モーメントが発生する。

外部政治場 H_0 と 回転磁場 $H_1 \sin \omega t$ (回転座標系で見る)

核モーメント μ は、合成磁場 H_{eff} の周りにラーマー運動する。 H_{eff} は $H_0' = H_0 - \omega/\gamma$ と H_1 の合成磁場。ここでガンマはジャイロマグネティックレシオ。



NMR

- 共鳴周波数で核磁気モーメントを横倒しに出来る。あるいは逆向きに出来る。そこで
(ゼーマンエネルギー) $\times$ (ボルツマン分布の差)
 $\times$ (総陽子数) のエネルギー吸収が起こる。
- 吸収されたエネルギーは必ず放出されて、系は熱平衡に戻る。

NMR共鳴吸收

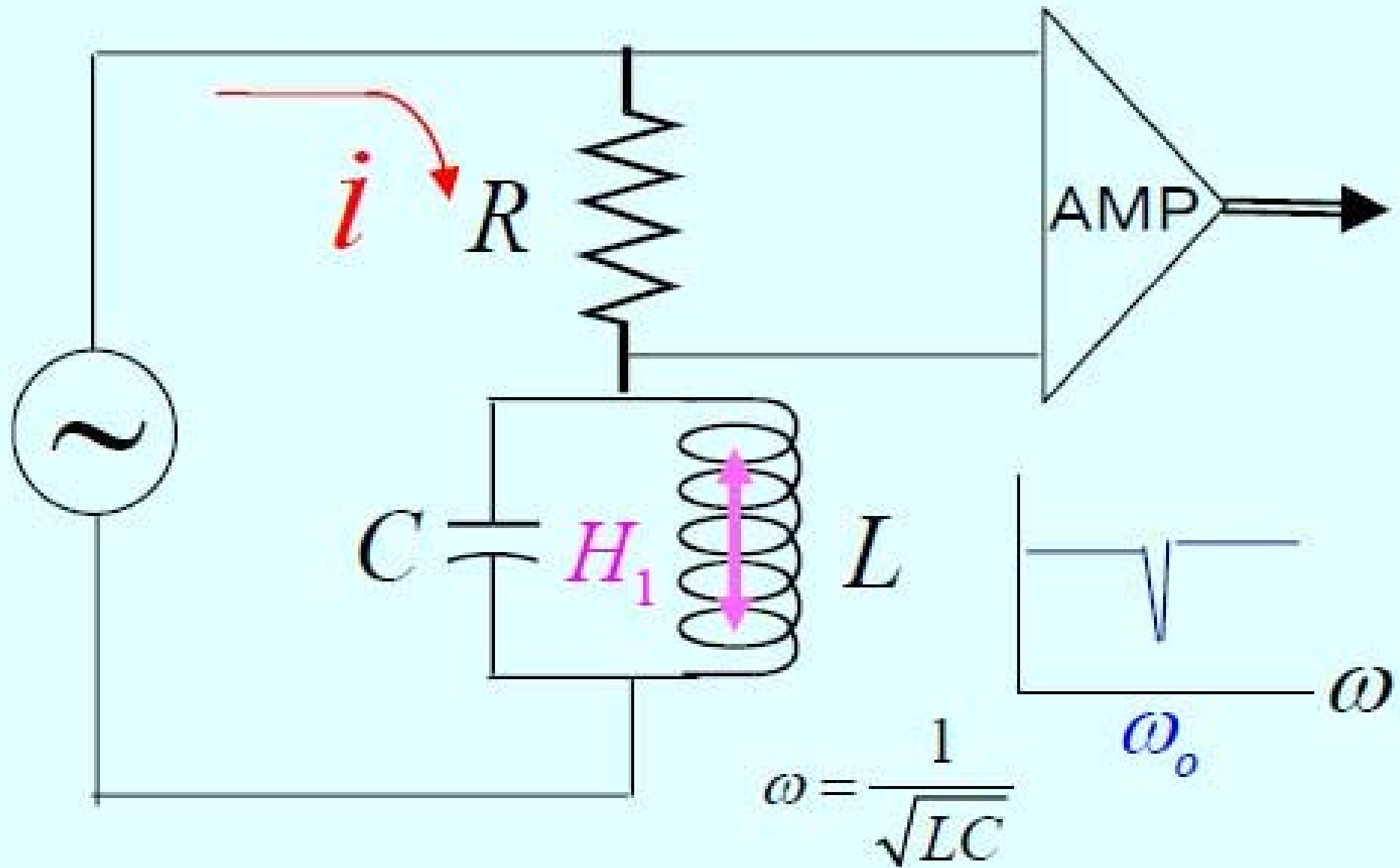


表1 $B_0=1\text{T}$ の場合の代表的なNMR核種の特Ⓕ性

核種	共鳴周波数 (MHz)	天然存在比 (%)	相対強度	人体構成比 (%)	検出感度
^1H	42.6	100	1	63	1
^2H	6.536	0.016	0.0096	63	1.5×10^{-6}
^{13}C	10.7	1.1	0.016	9.5	2.7×10^{-5}
^{19}F	40.1	100	0.834	0	0
^{23}Na	11.3	100	0.093	0.04	6.0×10^{-5}
^{31}P	17.2	100	0.066	0.2	2.0×10^{-4}
^{14}N	3.1	99.6	1.0×10^{-3}	1.3	2.1×10^{-5}

NMR核種は陽子または中性子の数が奇数の原子核である。

下記の出典をもとに作成した。

[出典]池平博夫:特集「MRIの新技术と臨床応用」、MRスペクトロスコピーの現況、
日獨医報、Vol.39、No.4、p.100(1994)

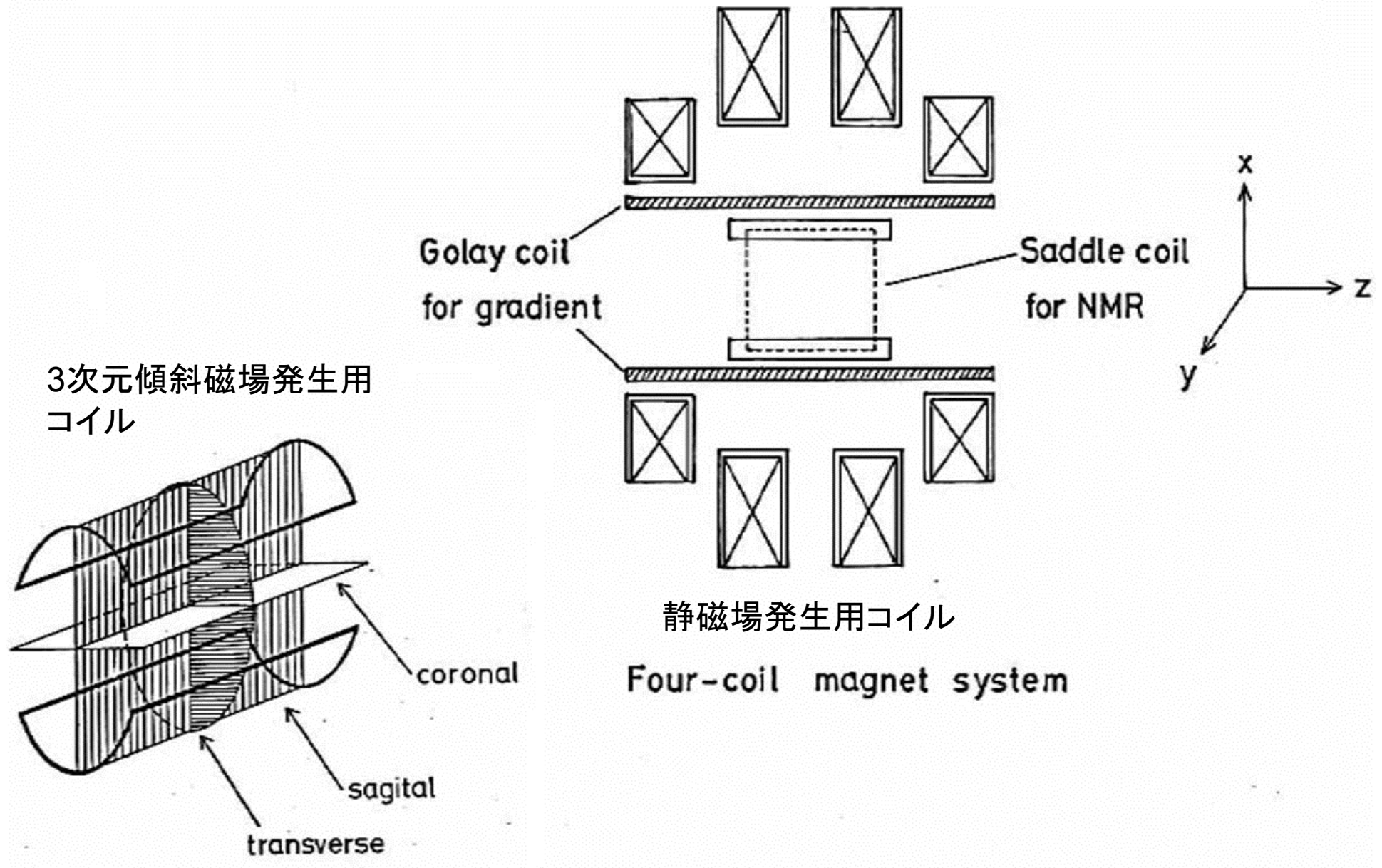
ちょっと寄り道：NMRからMRIへ

- エネルギー吸収と共鳴周波数は、電子分布=化学的状态によって微妙に変わる。
- 3次元の傾斜磁場を一樣磁場に重畳させて発生させ、その励磁を変えてゆけば、ある特定の空間的位置のNMRが出来る。
- さらに緩和時間法などの高度なNMRを用いる事により、分解能があがる。
- 生体断層データの構成が出来るようになった。

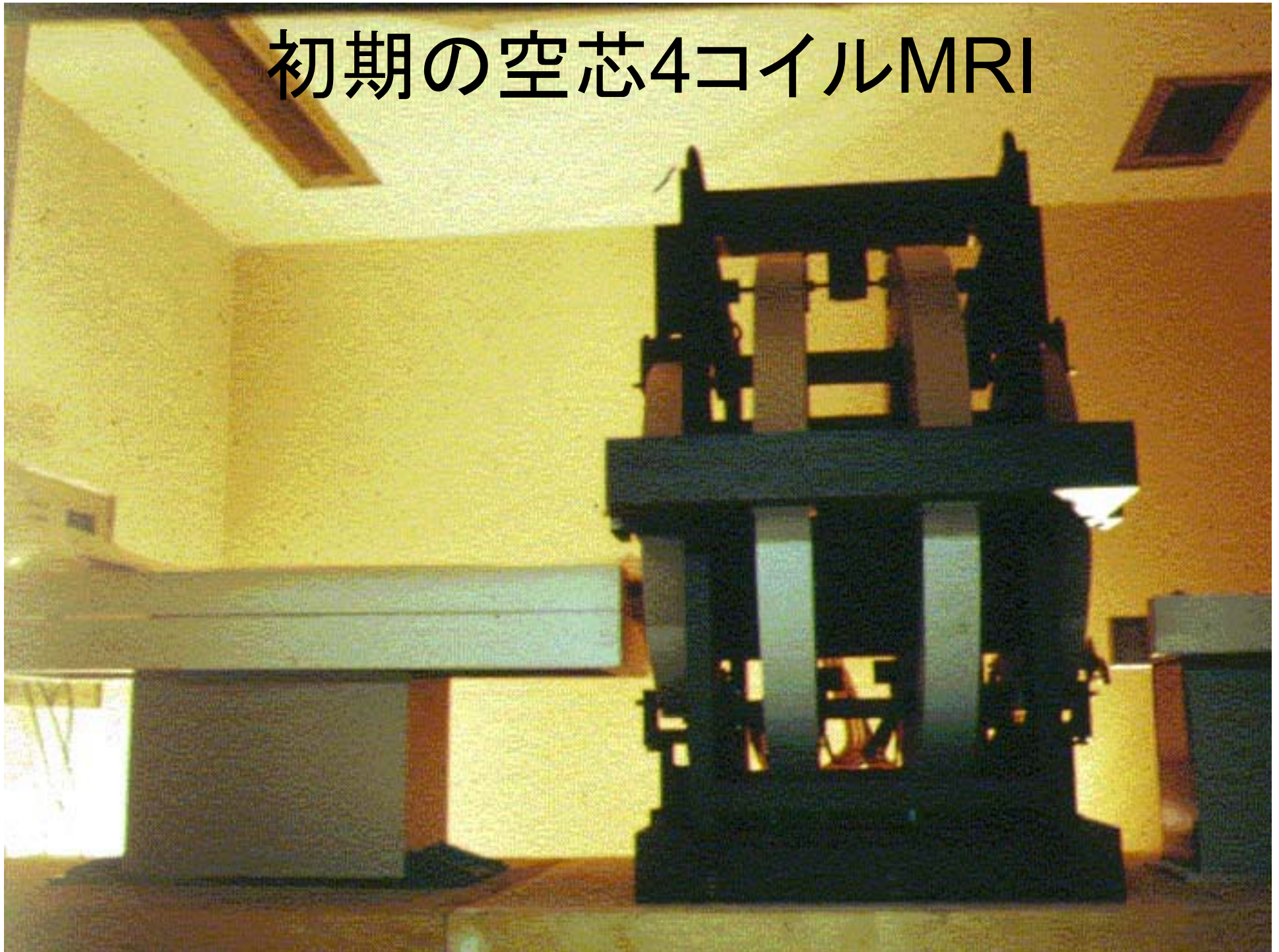
NMRNMR映像法の原理

- 均一な外部磁場に、位置に比例した線形の勾配磁場を重畳させる
- 内部の位置に比例した共鳴周波数とそれに対応する強度の分布が得られる
- 磁場勾配の方向を変化させ周波数分布の投影データを収集する
- 投影データをもとにして周波数分布を位置の情報に変換し強度を画像化する

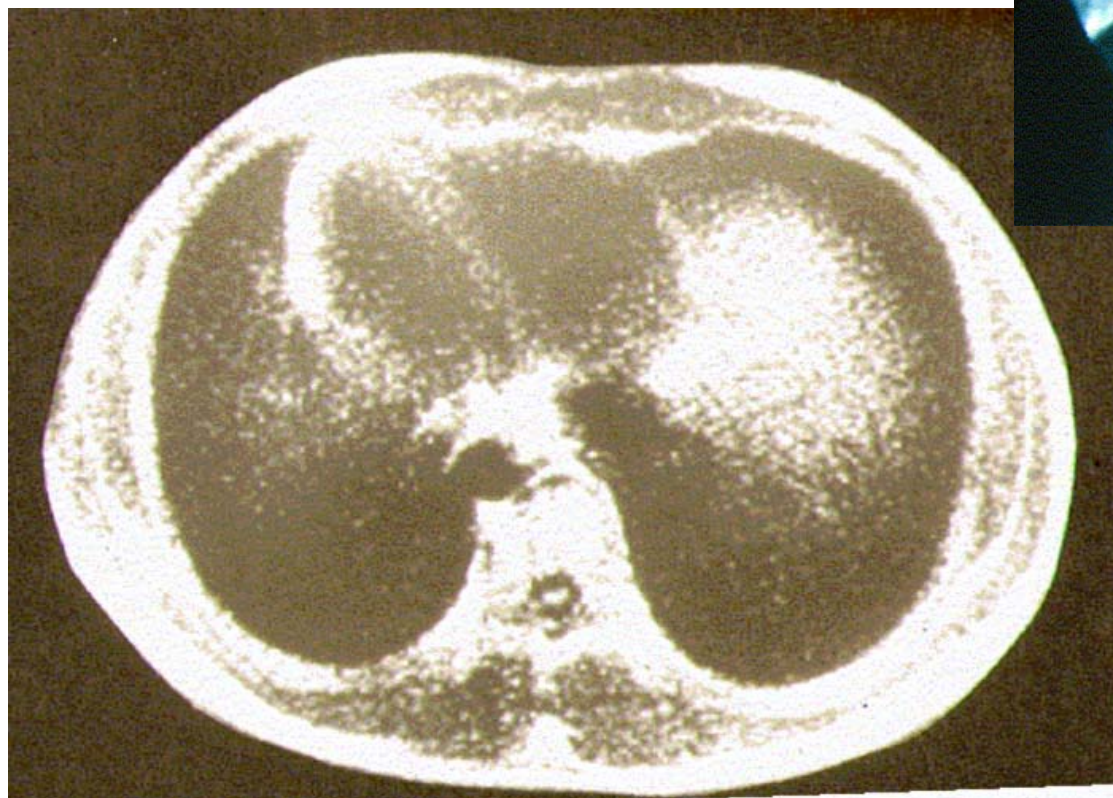
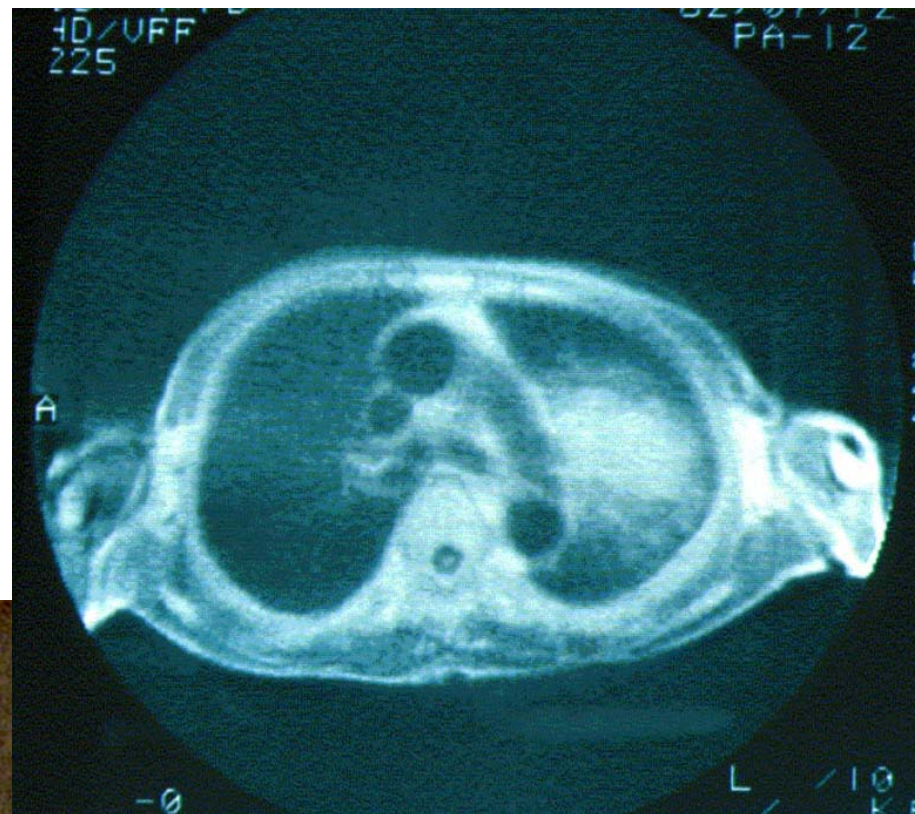
MRI用の磁場発生システム



初期の空芯4コイルMRI



初期の頃のMRI 画像。 (人体の断面)



耐放射線電磁石

耐放射線性とMIC

- 特に放射線に弱い物質
(加速器環境で使用する磁石には不可！)
ブチルゴム、バイトン、テフロン系のもの、
- 比較的放射線に強い物質
EPゴム、ポリイミド系のもの、
- 超耐放射線仕様
全てのパーツの無機化

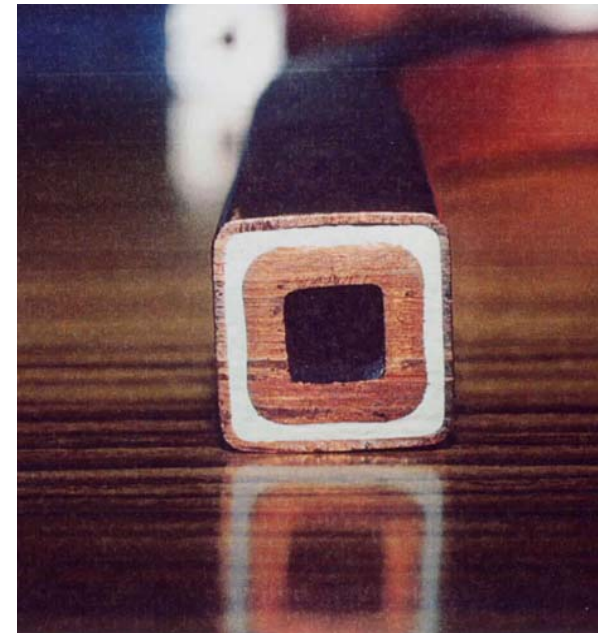
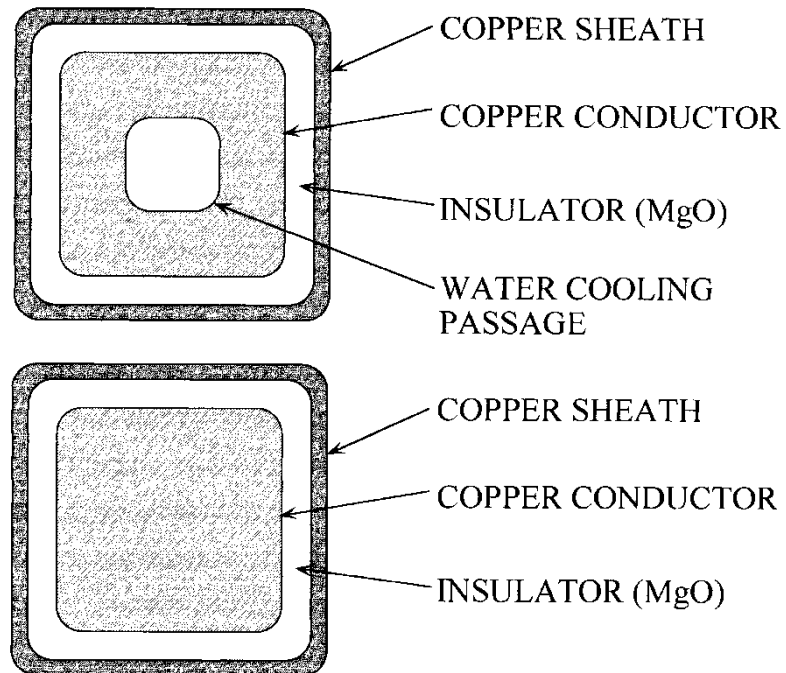
Radiation-Resistant Magnets

II

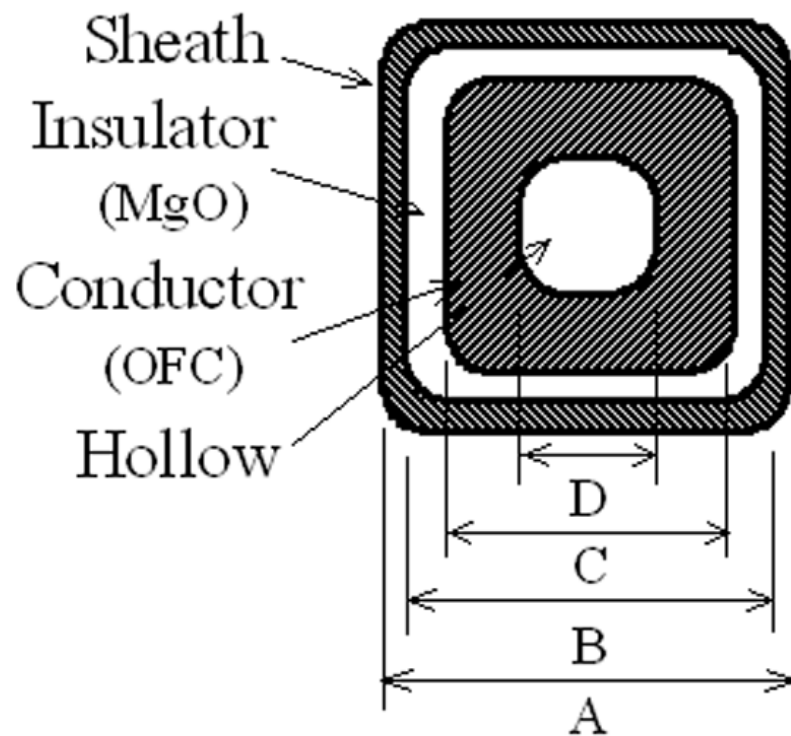
The Key Technology for JHF

- Development of Long and Large Cross-Section Mineral Insulation Magnet Cable (MIC)
 - Solid Conductor (SC-) MIC
 - 2500A class, 60m @ MT16,
 - Long enough, How to COOL it?
 - Hollow Conductor (HC-) MIC
 - 2500A class, 30m @ MT16,
 - Cooling is easy, How to DOUBLE it?

SC-MIC and HC-MIC



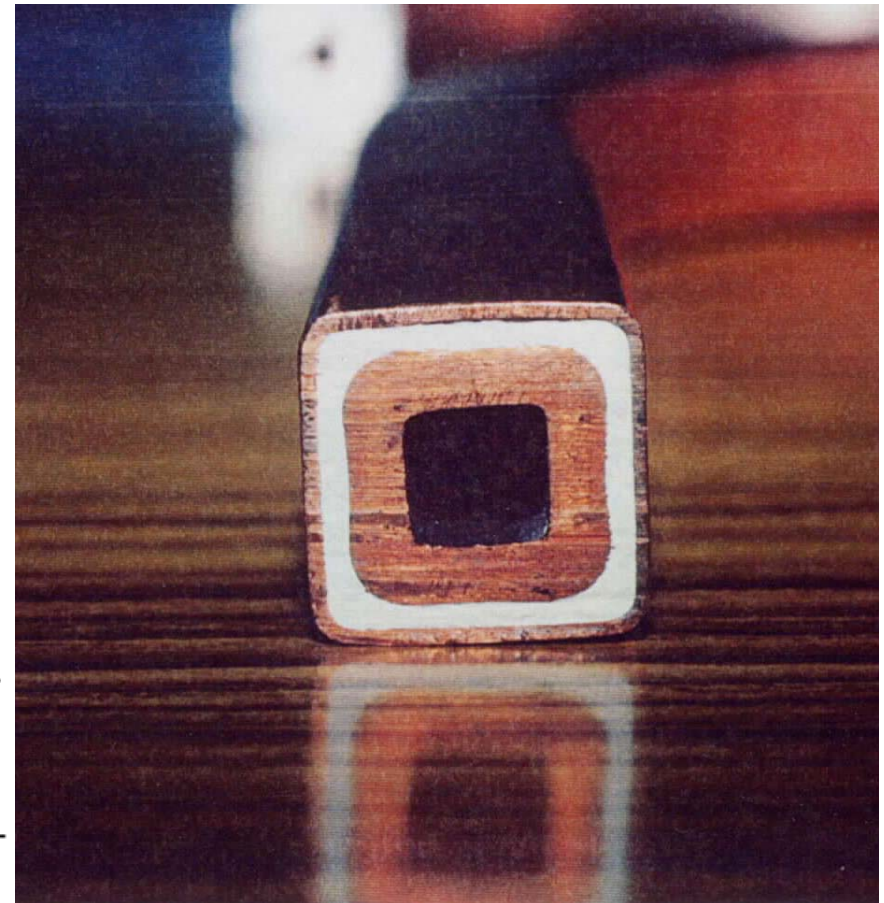
Typical cross-section of the HC-MIC (right and left- top)
and SC-MIC (left-bottom).



Nominal Current (A)	2000	2500	3000	1000*	2000*
Dimensions (mm)					
A: Outward Size	20.0	23.8	28.0	18.0	14.0
B: Insulator Size	18.0	21.6	25.0	16.6	12.6
C: Conductor Size	14.6	18.0	20.0	13.2	9.2
D: Hollow Size	7.4	10.0	10.0	--	--
Cross Section (mm ²)					
Conductor	150.9	211.7	293.1	168.4	78.8
Insulator	117.7	153.2	227.4	106.6	79.4
Seath	73.4	95.3	150.6	47.8	36.6

* indicates Solid Conductor MICs. No hollow is in Cu conductor.

Mineral Insulation Cable



Doubling 2500A HC-MIC



Hydraulic Press
on MgO powder



Preparation of large size MgO block



Insert MgO to copper tube

Magnet coil winding by 60m-2500A HC-MIC



High-Pot. leak test

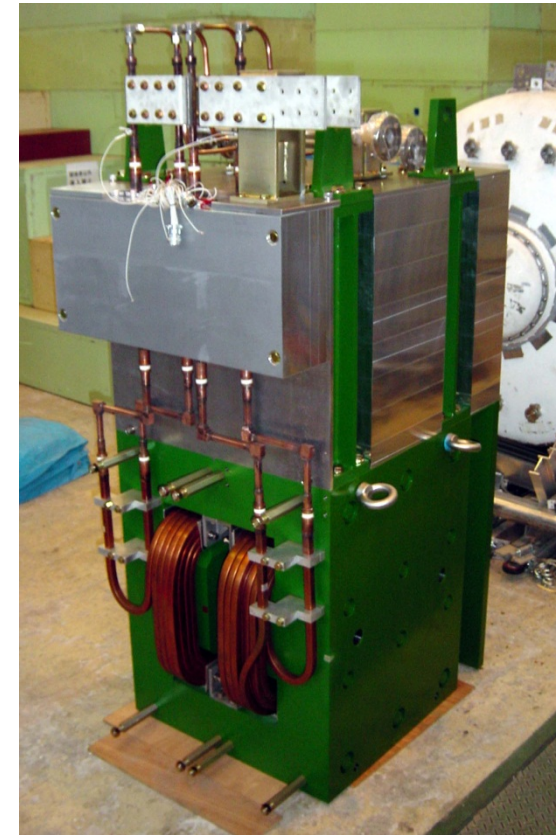


Coil winding!



The first coil of 60m-2500A HC-MIC

Magnet with 60m 2500A HC-MIC Coils

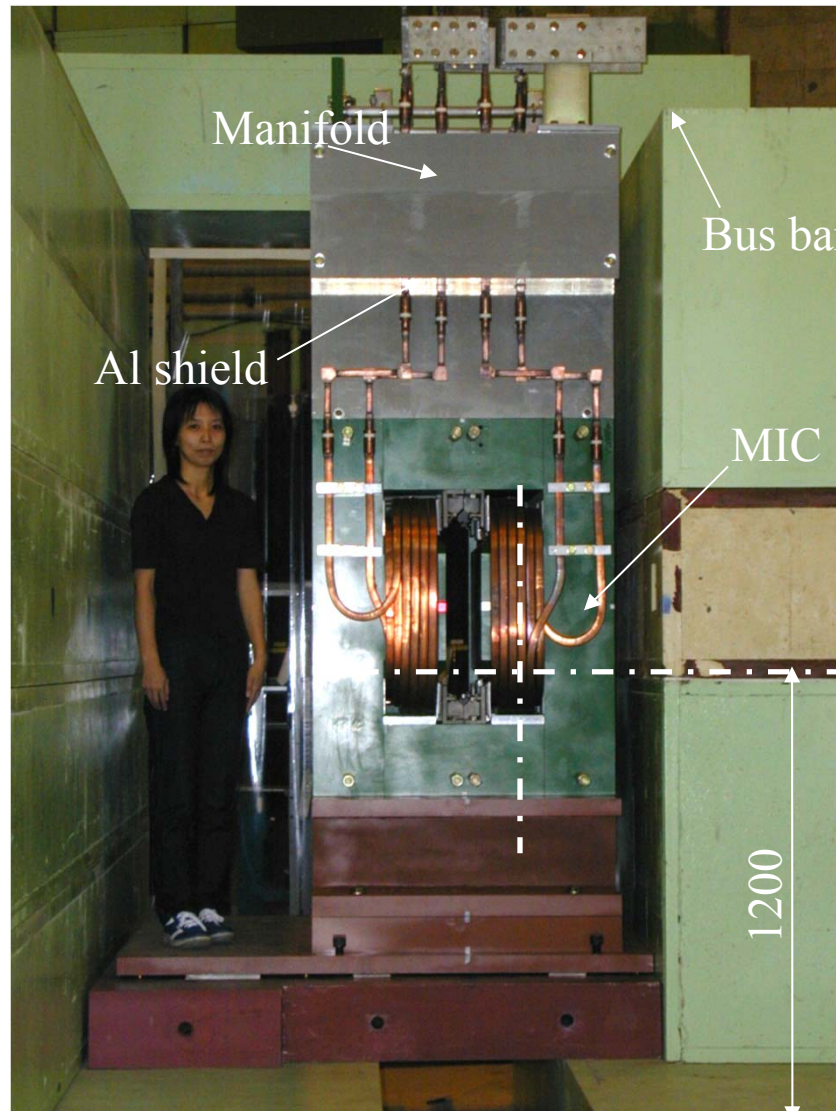


Nominal: 3000A/34V

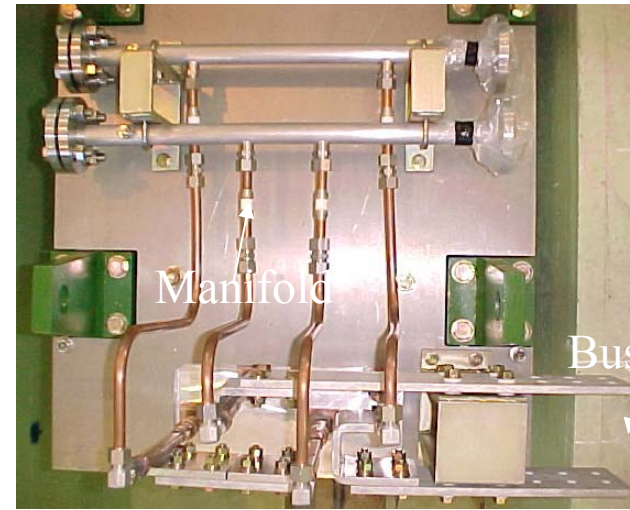
$\Delta T_{\text{water}} = 37^{\circ}\text{C}$ (35 Lit./m)

$\Delta T_{\text{water}} = 60^{\circ}\text{C}$ (35 Lit./m) $T_{\text{coil}} = 74^{\circ}\text{C}$ ($T_{\text{air}} = 18^{\circ}\text{C}$)
@3600A/41V(Max)

Mock up of the Primary Proton Beam Line



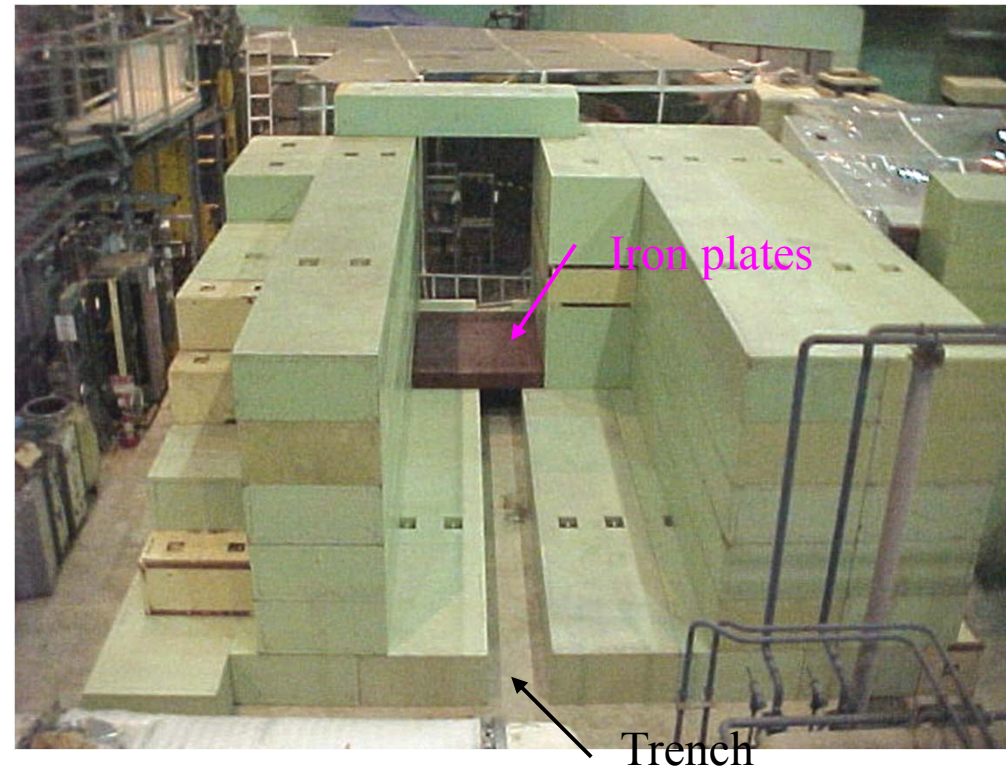
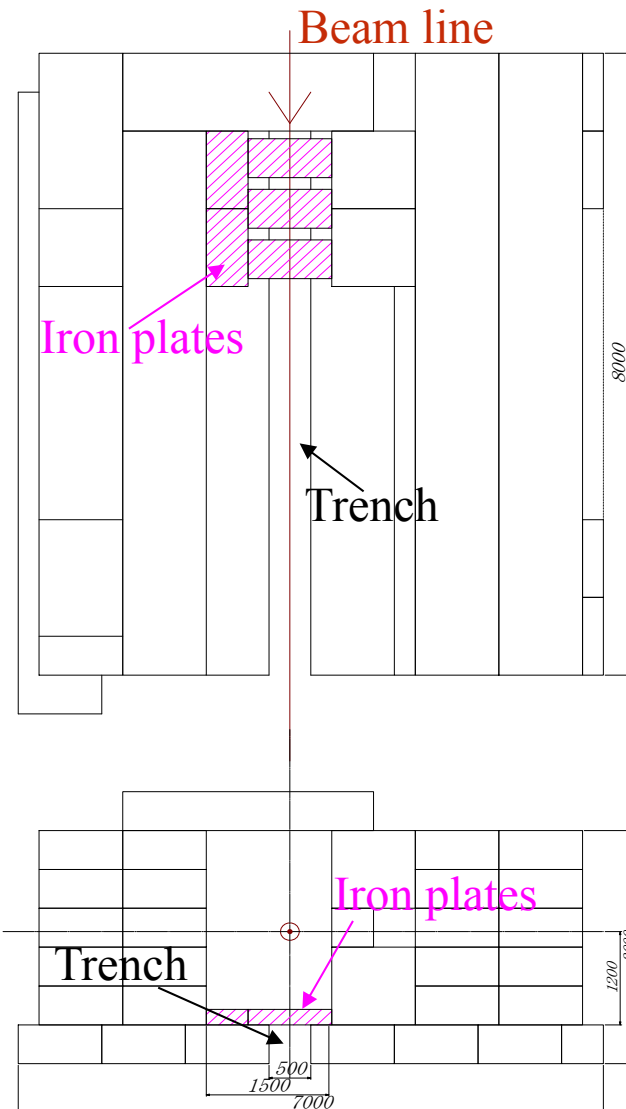
Front View



Top View

- Magnet: 8D216MIC
- Outer Size: $1060 \times 850 \times 800 \text{ mm}^3$
- Magnet Gap: $400 \times 100 \times 800 \text{ mm}^3$
- Nominal Current Voltage:
3000 A, 33.1 V
- Weight: $\sim 10 \text{ ton}$
- Beam Height: 1200 mm

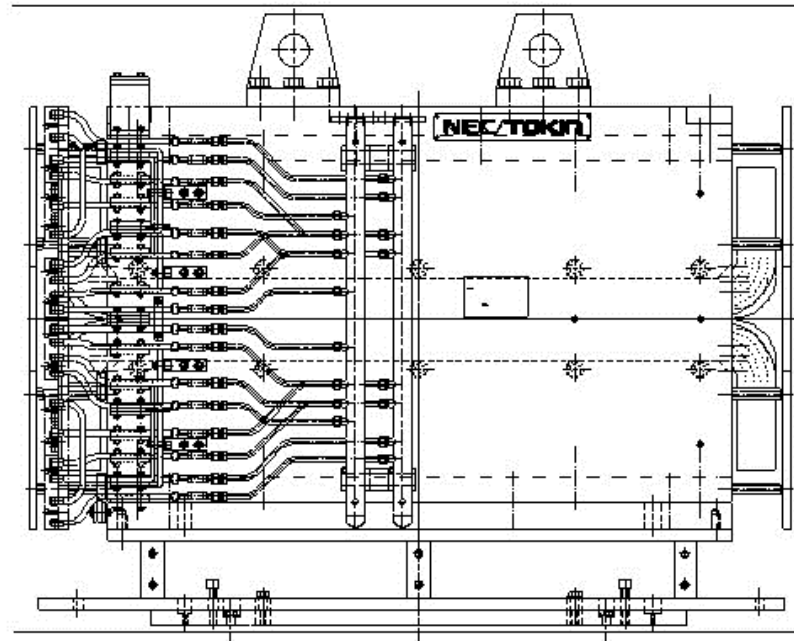
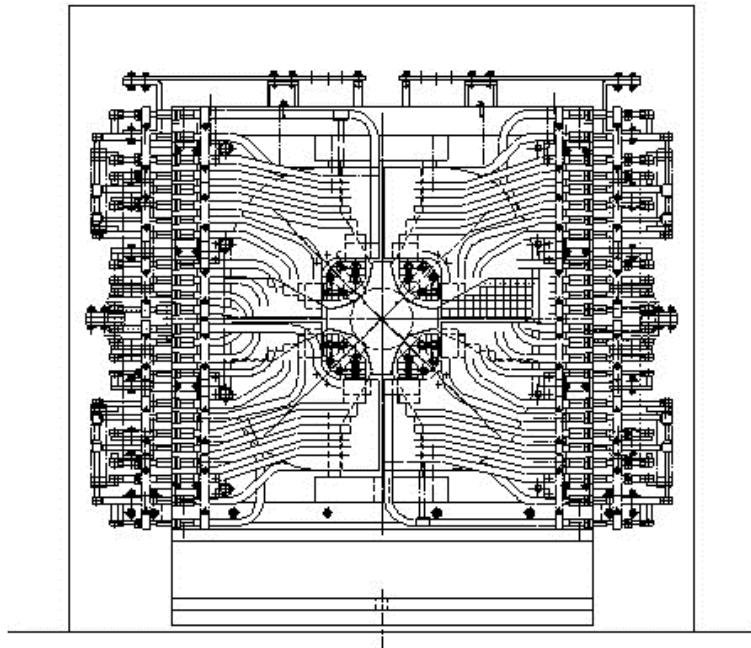
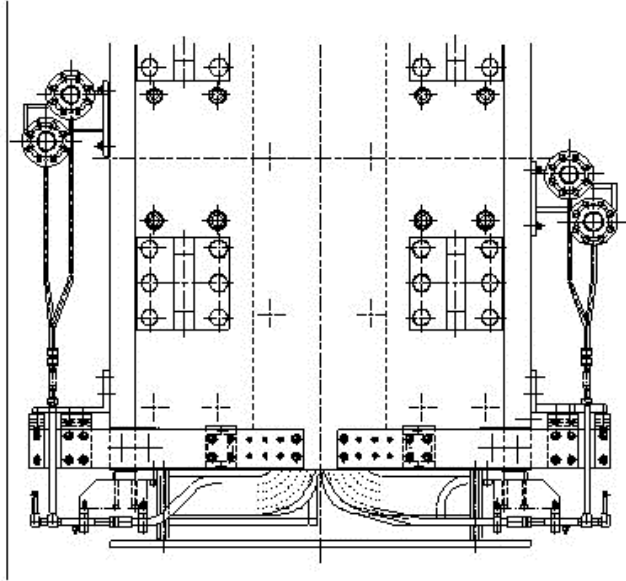
Concrete shield for the Mock up



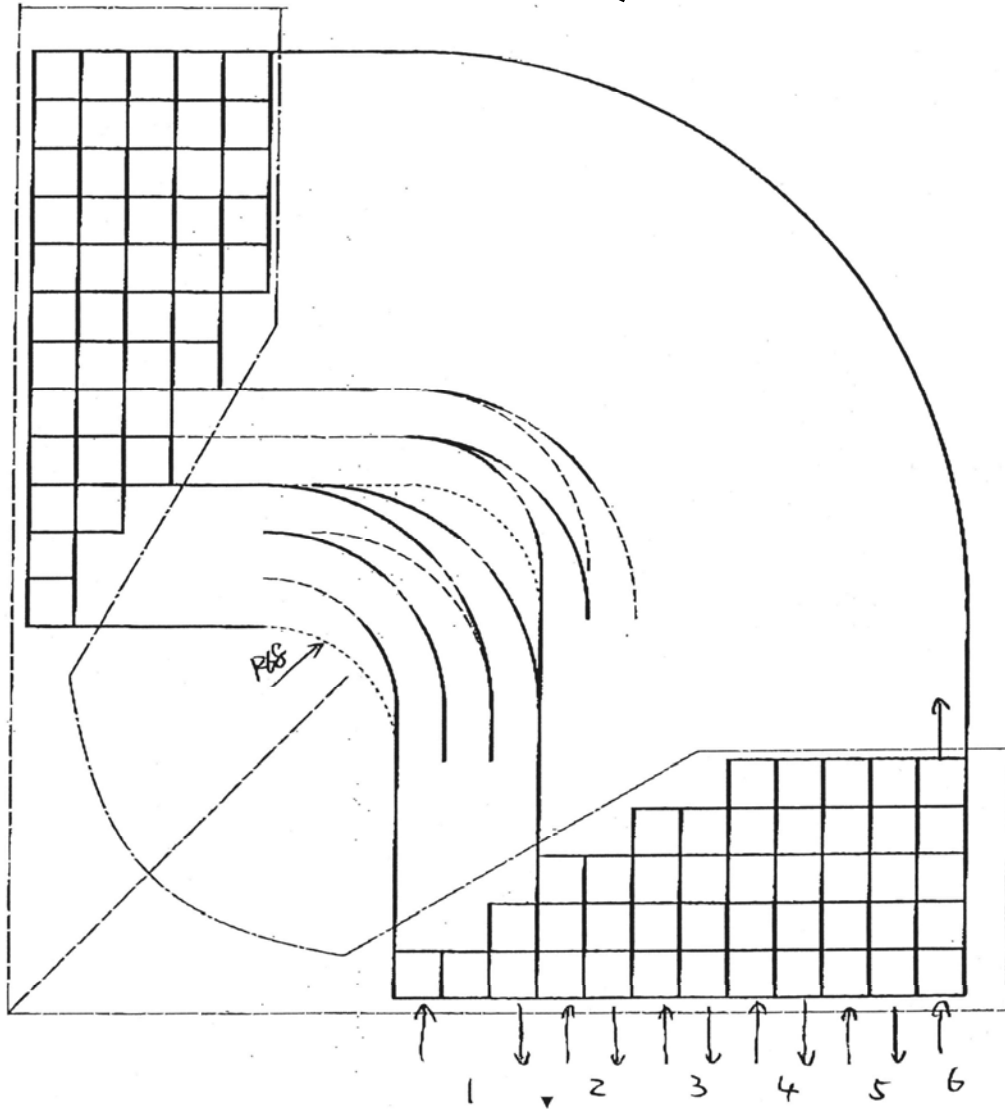
For the Test of
“Quick disconnect”!

Q440MIC Magnet

- 20cm bore Diam., 200cm Pole Length
- 43T/pole, 1.3T@pole
- Nominal current/voltage=2200 A/200V
- Cooling water=290 L/min.@1MPa
- Cooling water Temp. rise=30 °C
- Approximate Weight=33ton

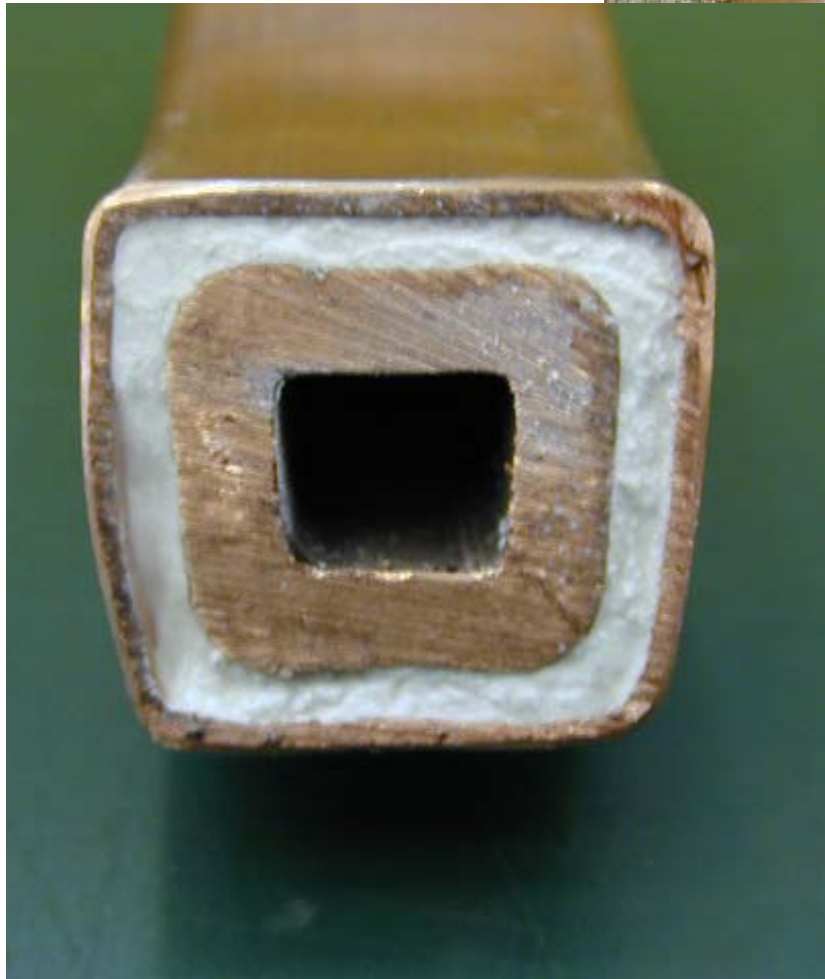


Q440MIC Coil Design



- 4+14+25
- Total 43 Turns
- 6 Conductors
- 4 water path/coil
-
-
-

Unwanted
inward width
expansion



Bending Tests
at small radius



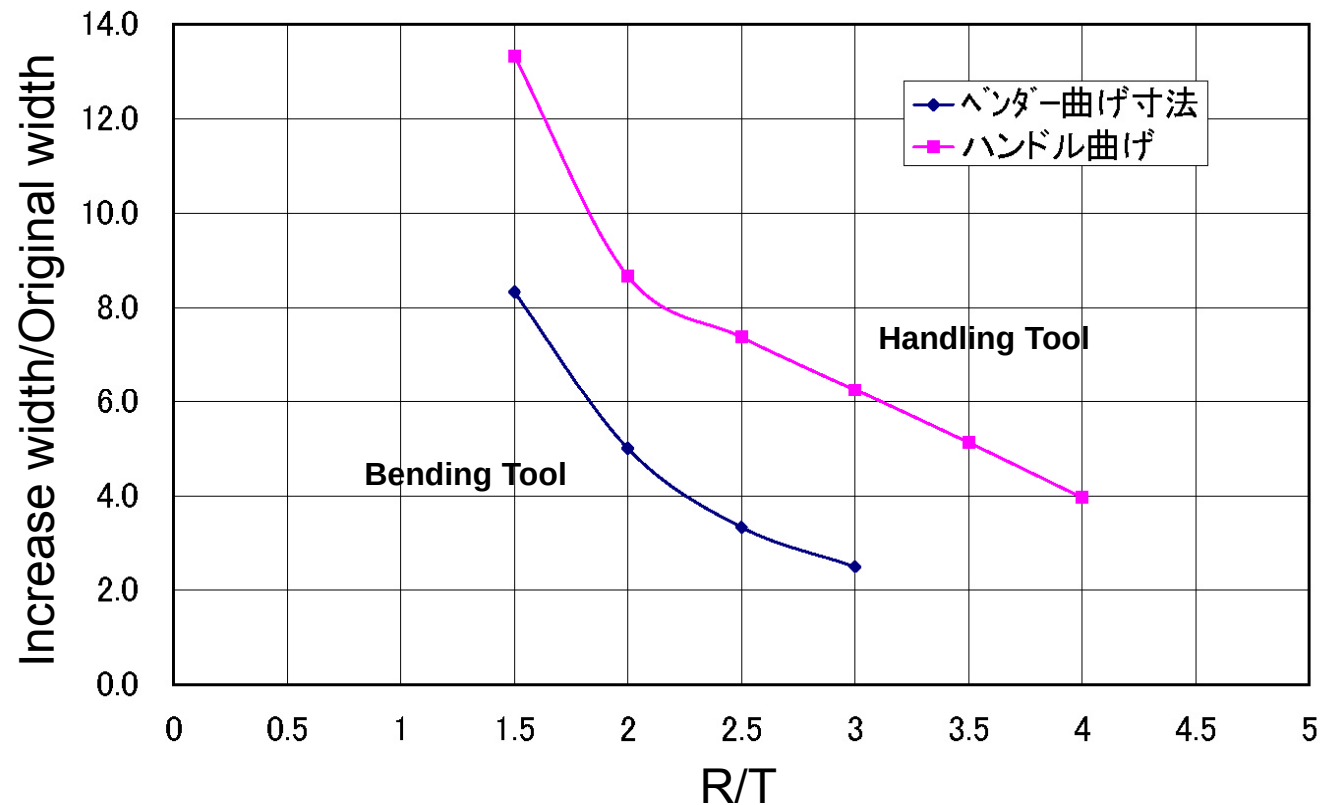
$R/T=1.5 \uparrow, 2.0 \downarrow$



$R/T=2.5 \uparrow, 3.0 \downarrow$

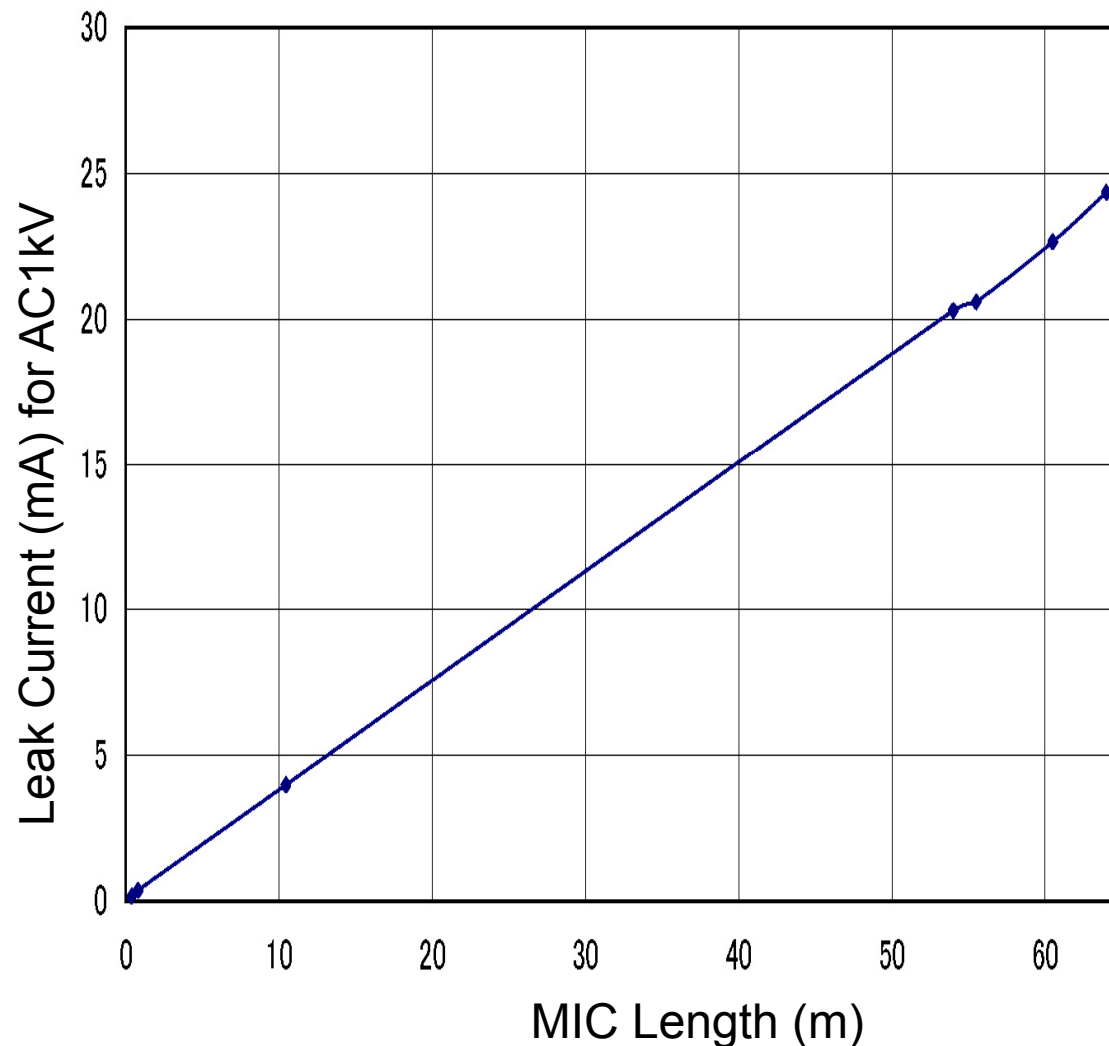


How much MIC become thicker?

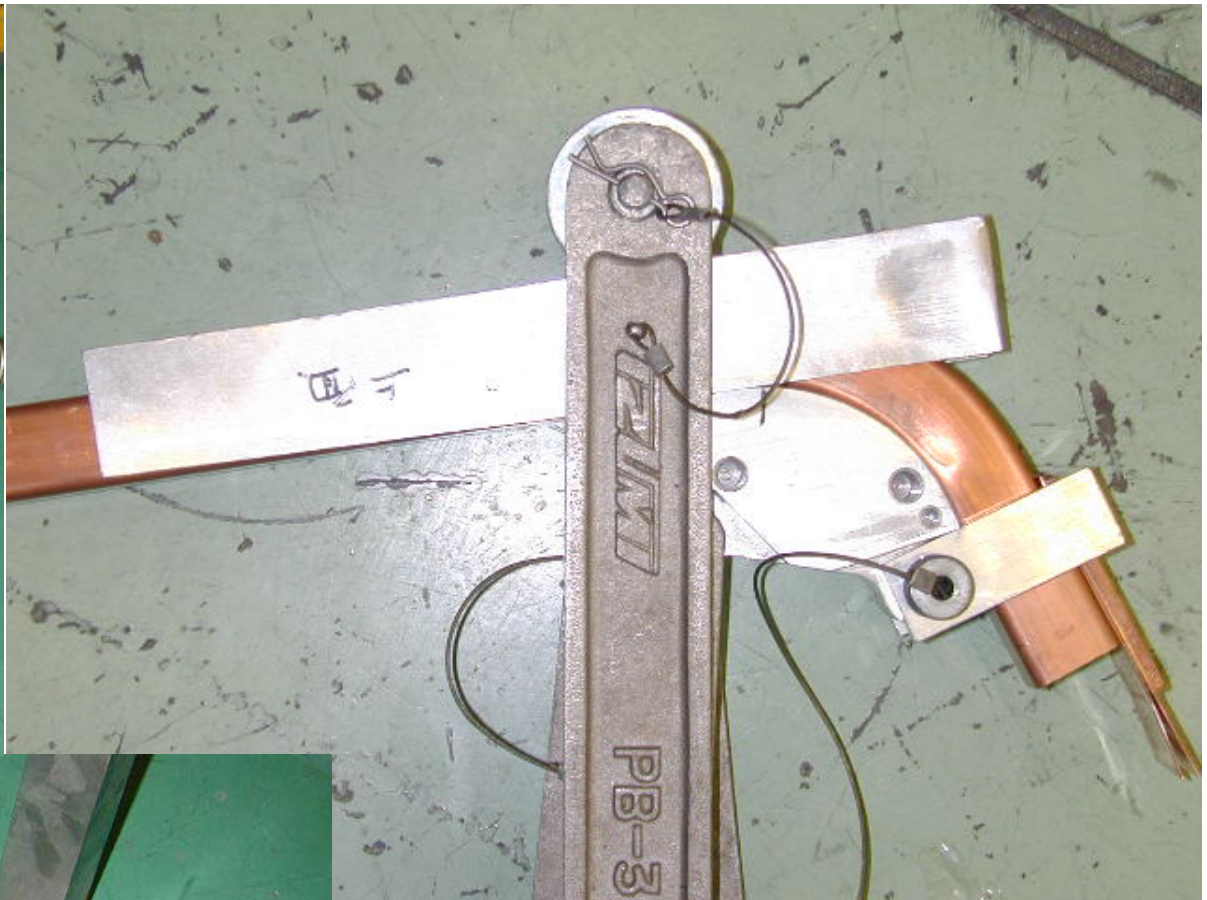
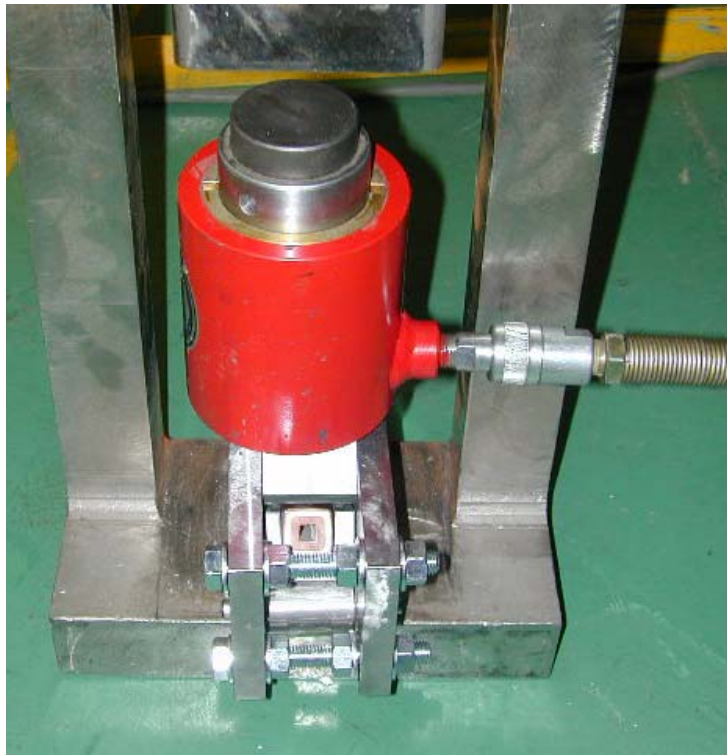


- 8-13% for $R/T=1.5$
- Employ “Bending Tool” and $R/T \sim 2$

Leakage Current Check for 2500A-Class MIC bent samples

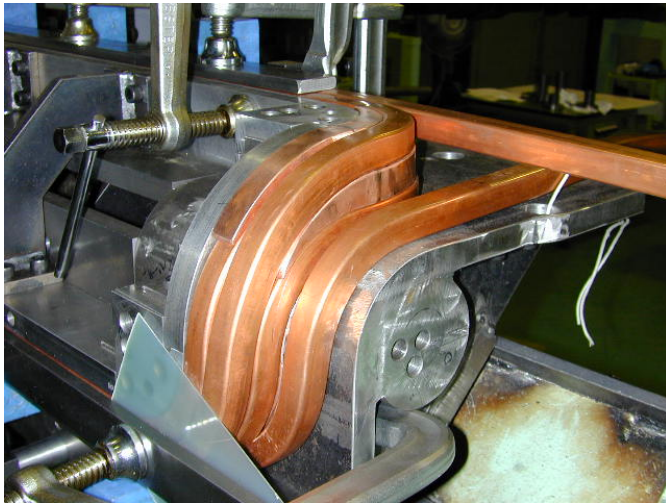


- No difference from Straight Samples
- Proportional to Long MIC
- Electrically NO PROBLEM even for $R/T=1$.

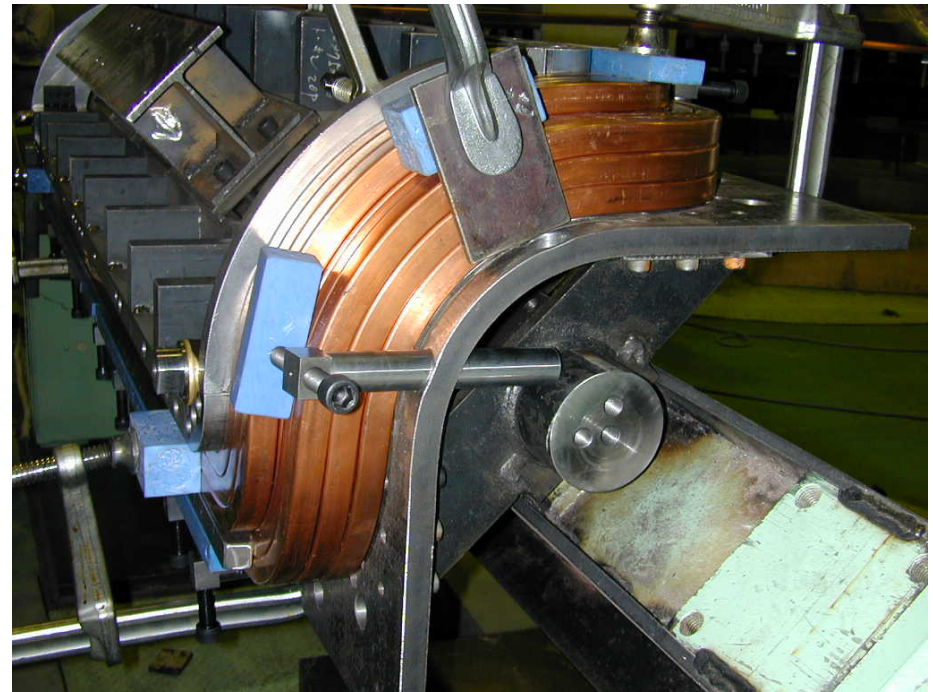


Tools for
fat-free
bending.

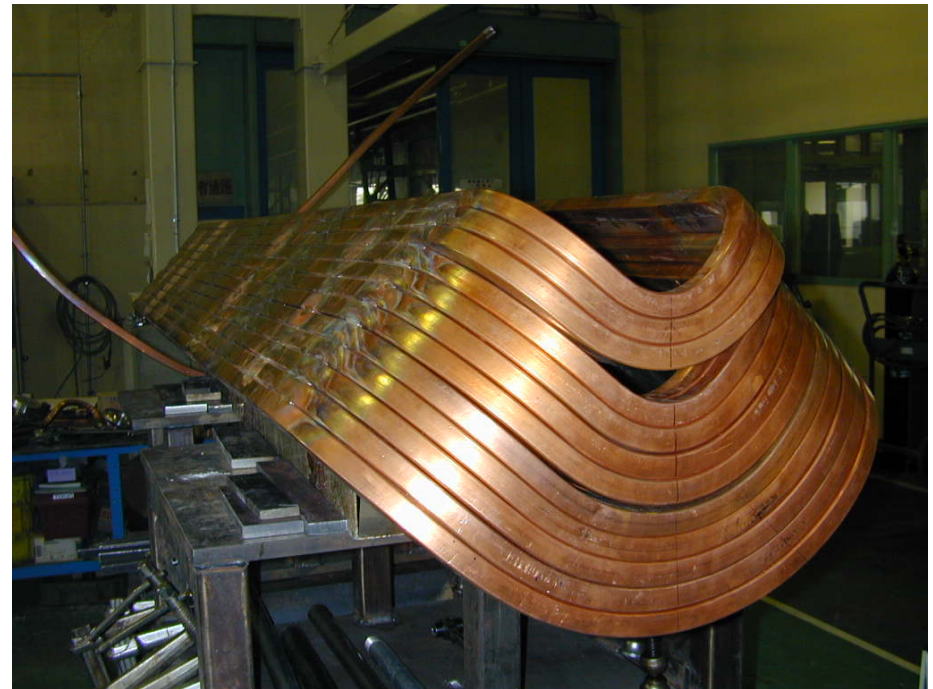
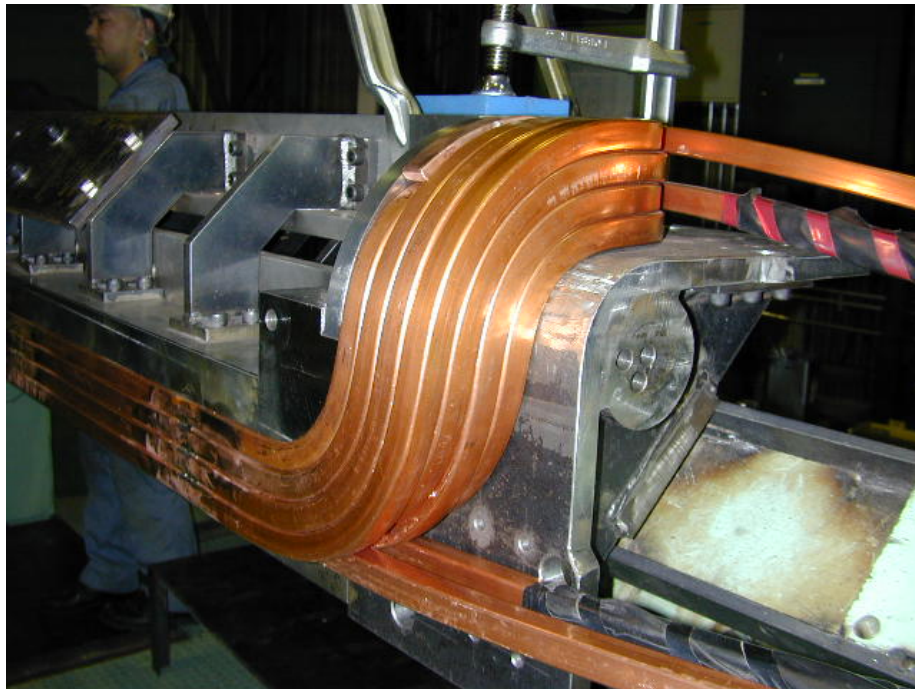
Coil Winding



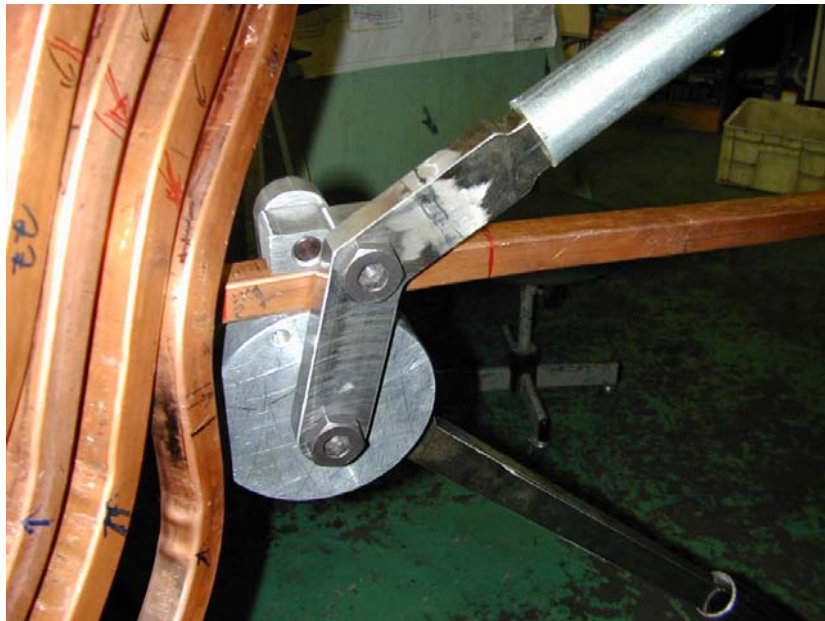
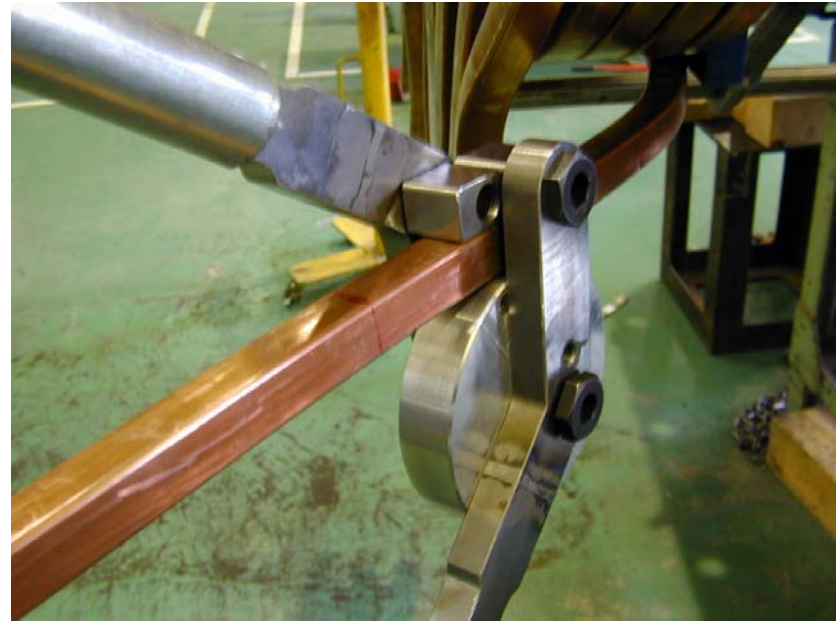
4turn coils↑, 14turn coil↓,



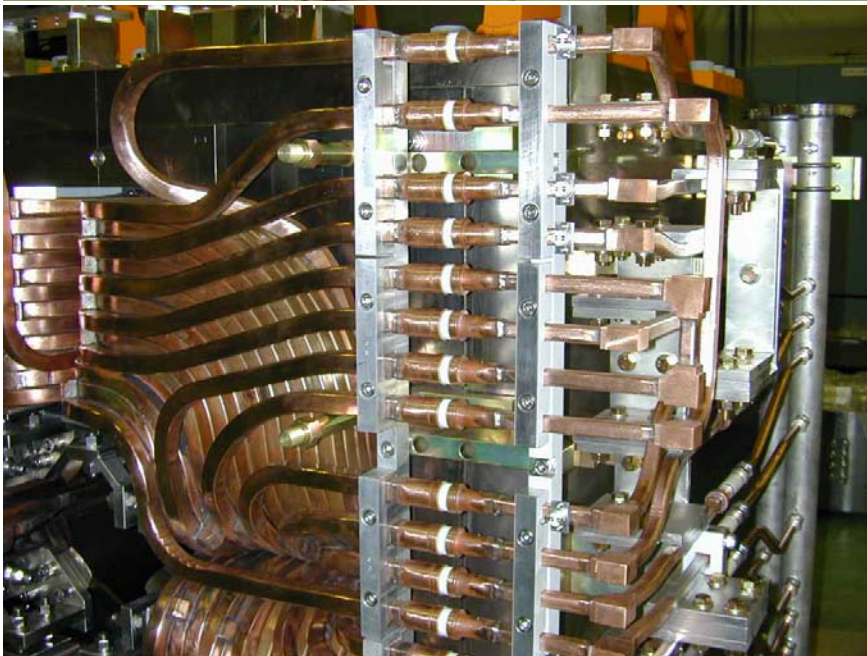
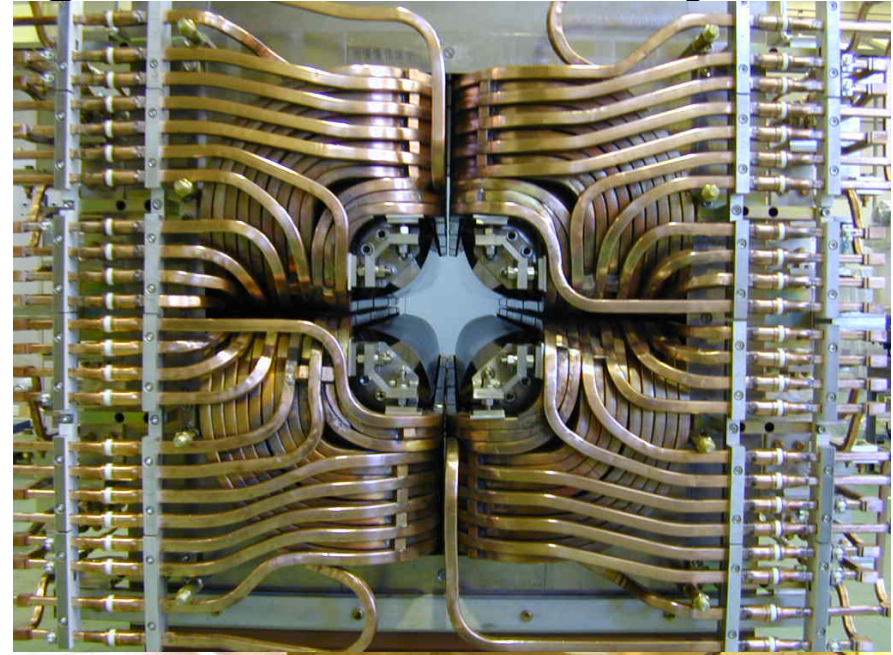
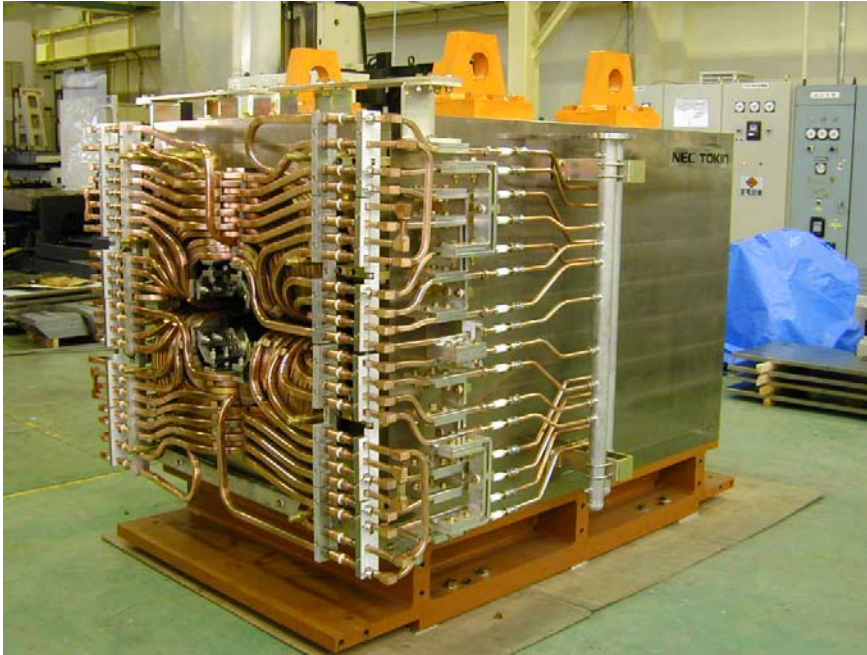
25 turn coil↑, Final assembly↓

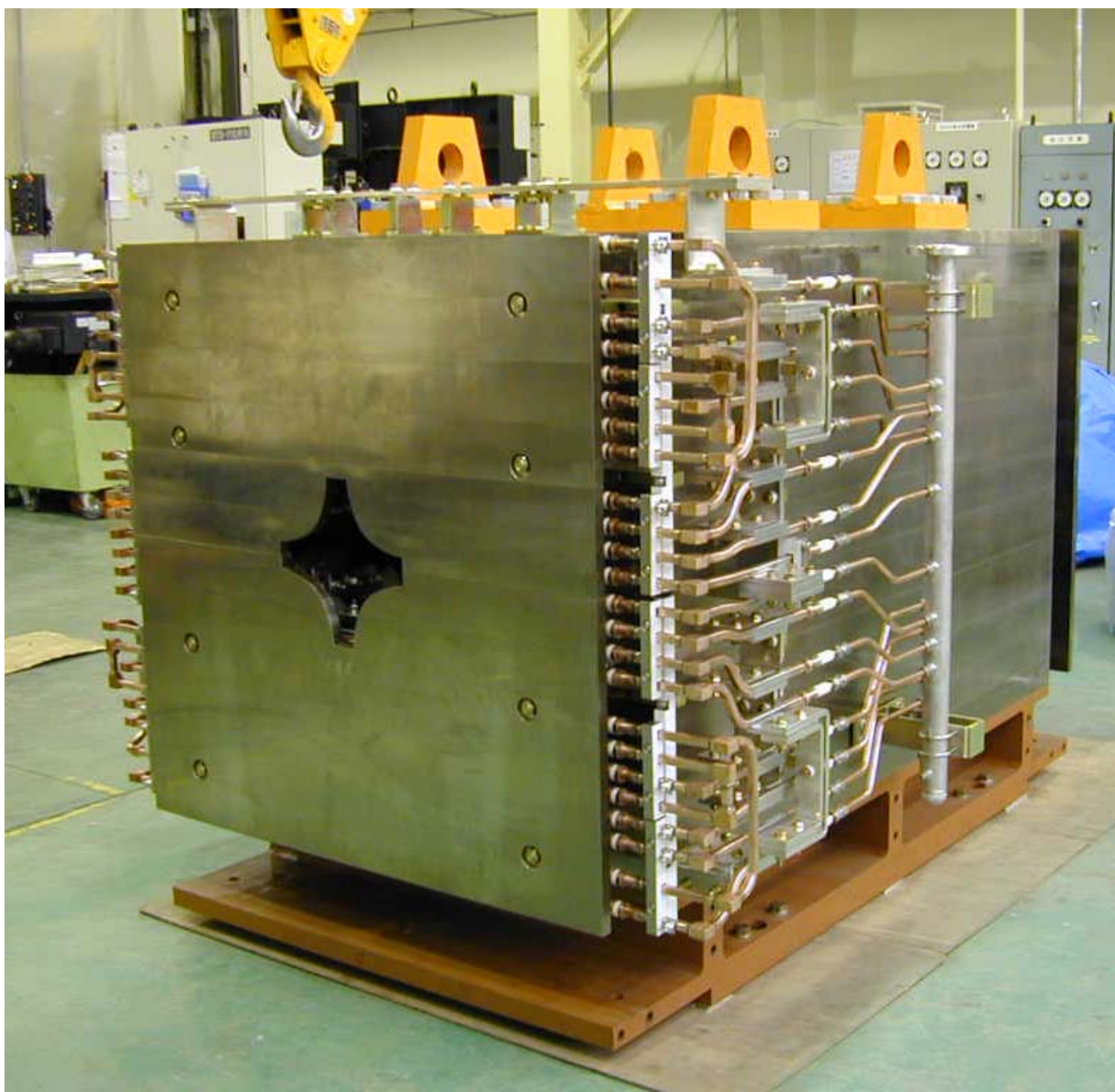


Terminal Treatments

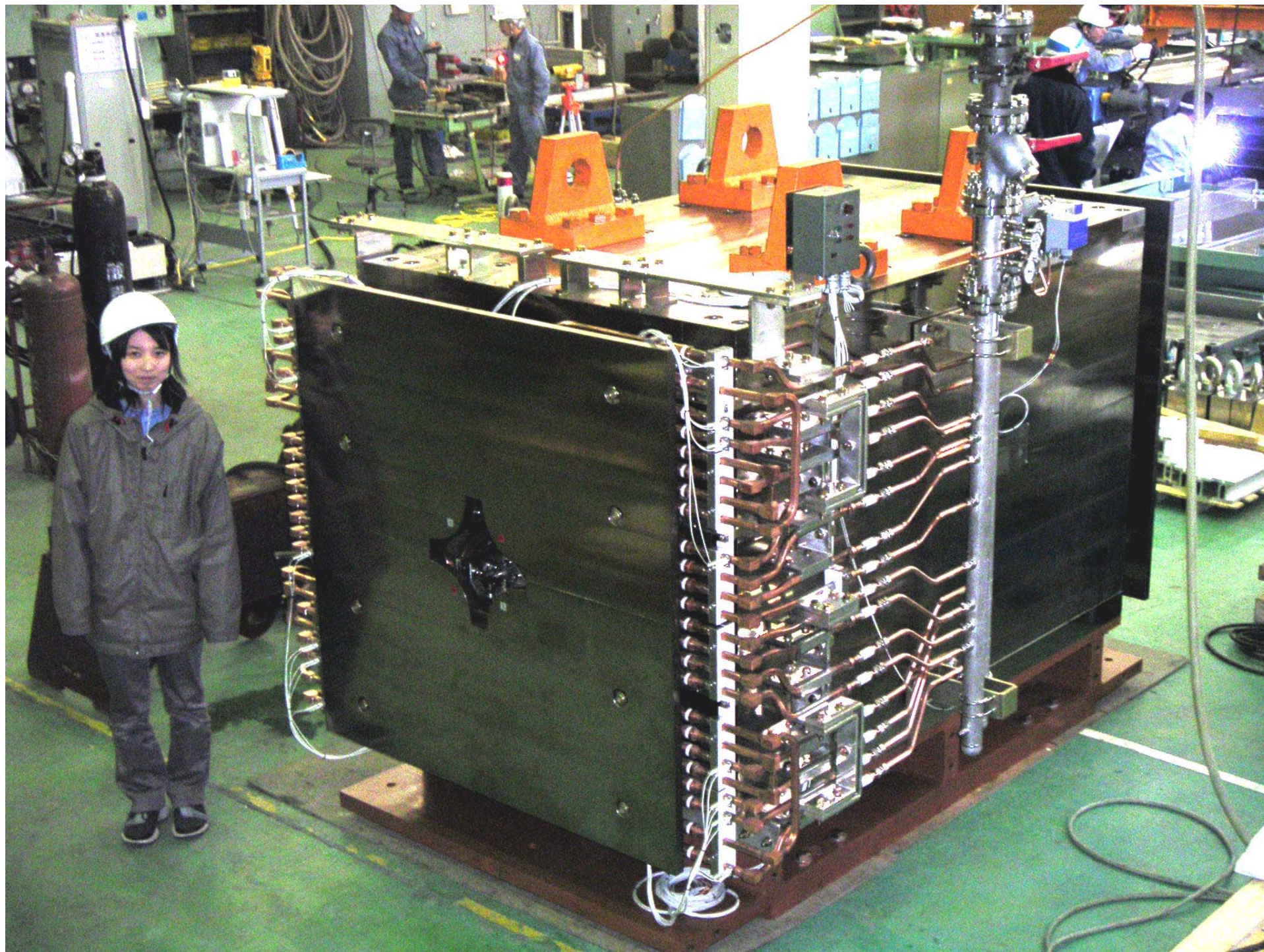


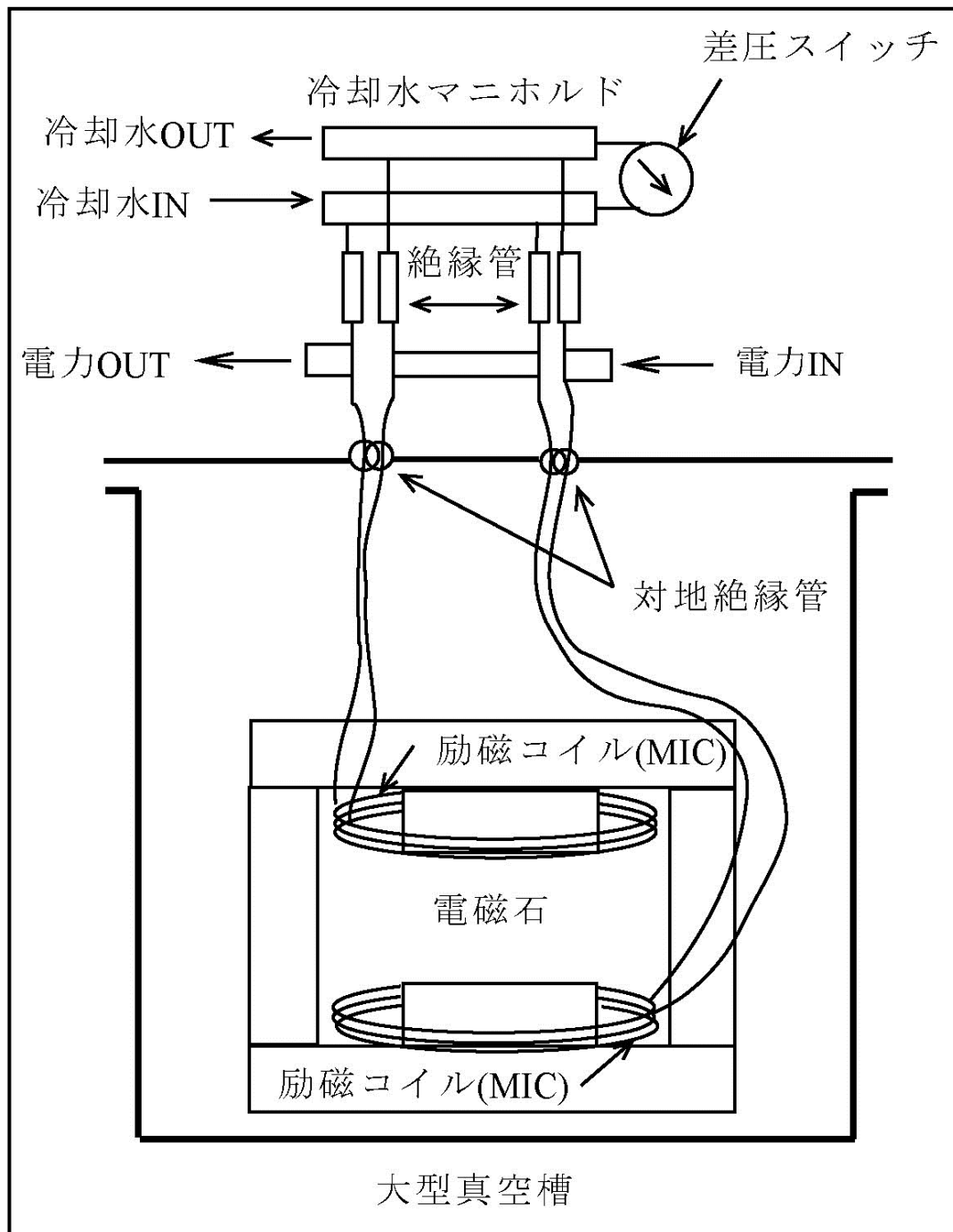
Q440MIC Magnet Assembly





Q440MIC
Completed!



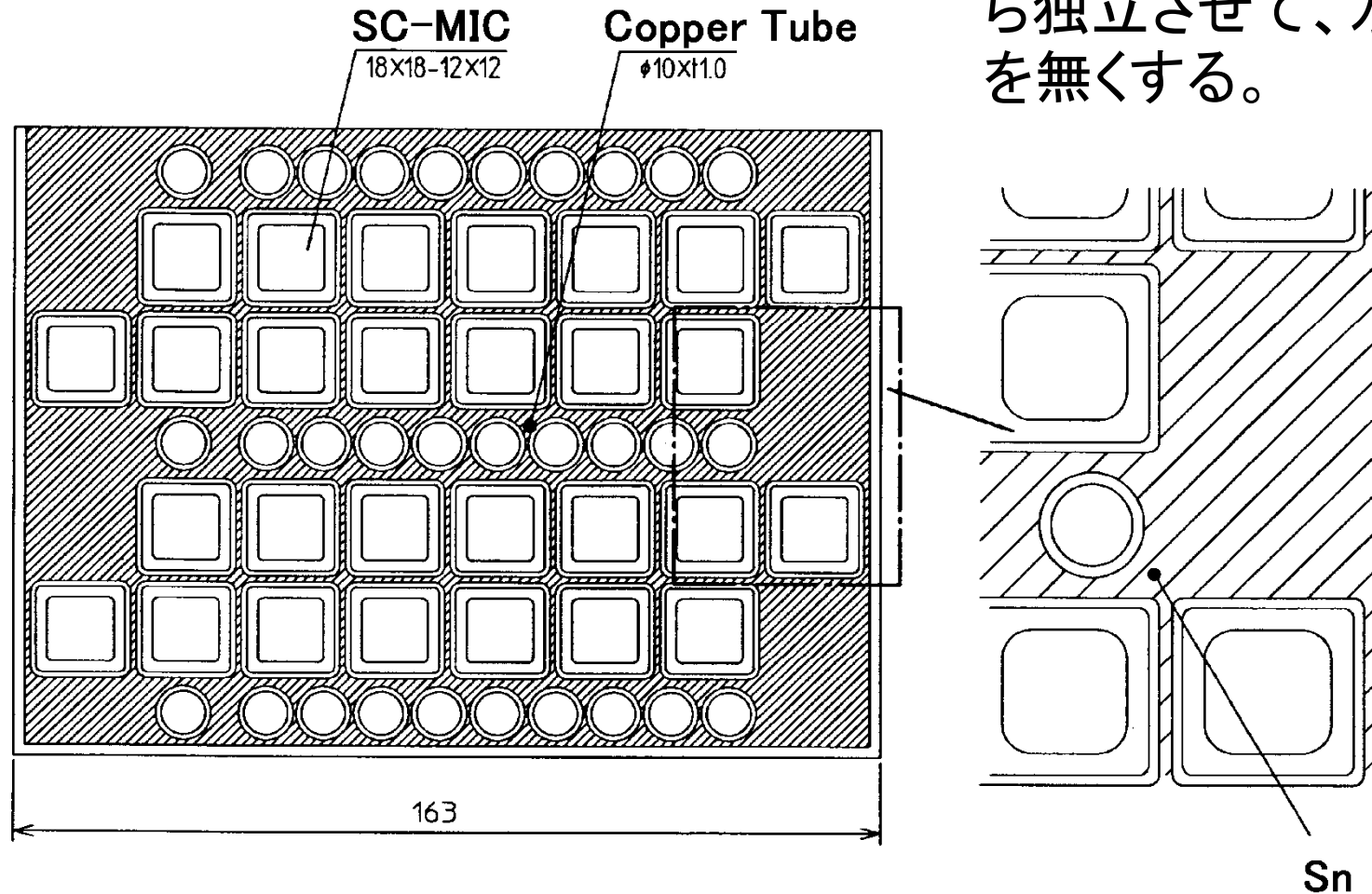


MIC磁石の応用

真空中で電磁石を運転する

真空ダクトを無くする事が可能！

間接水冷MICの採用



冷却水系を電気系から独立させて、水漏れを無くする。

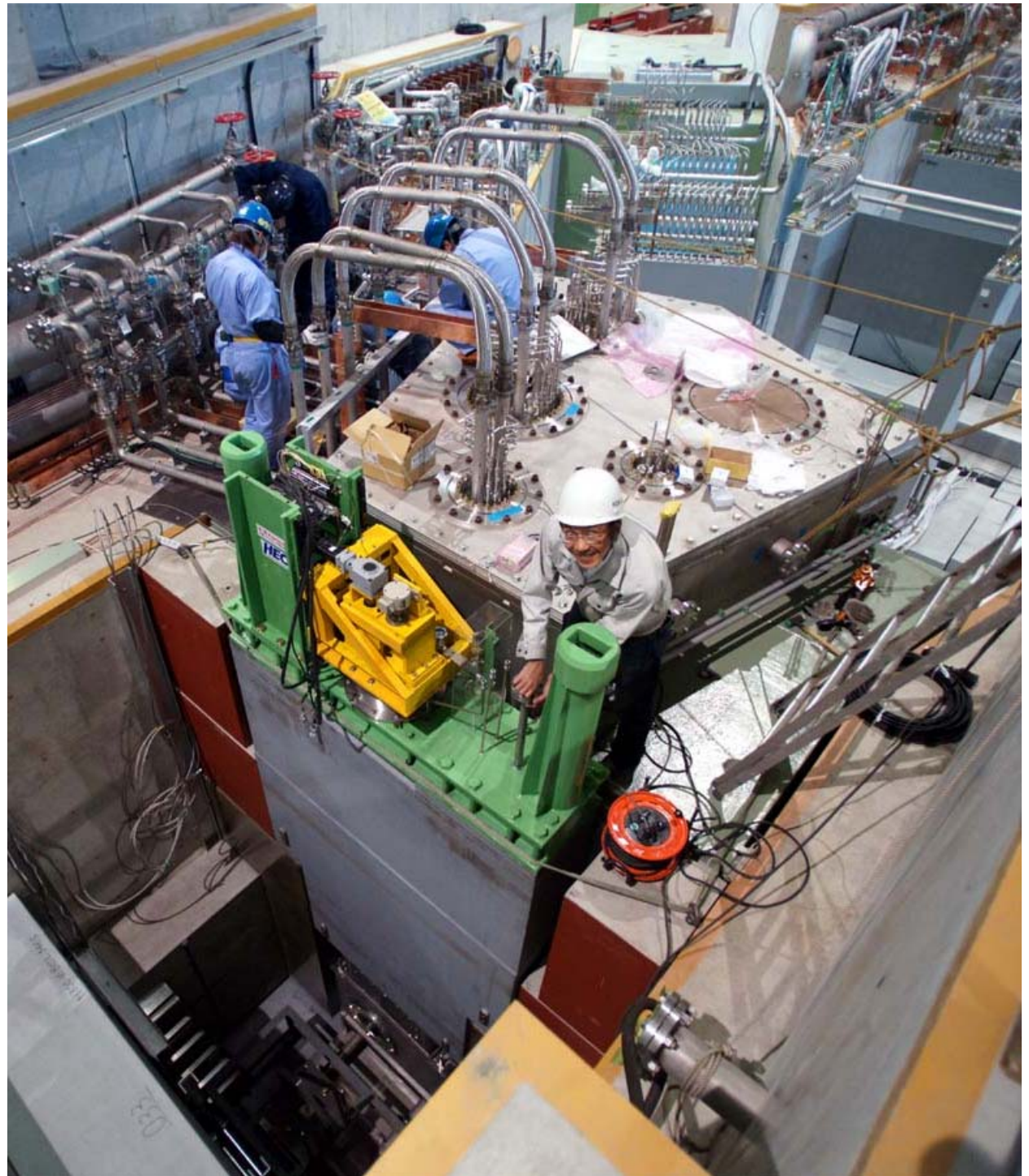
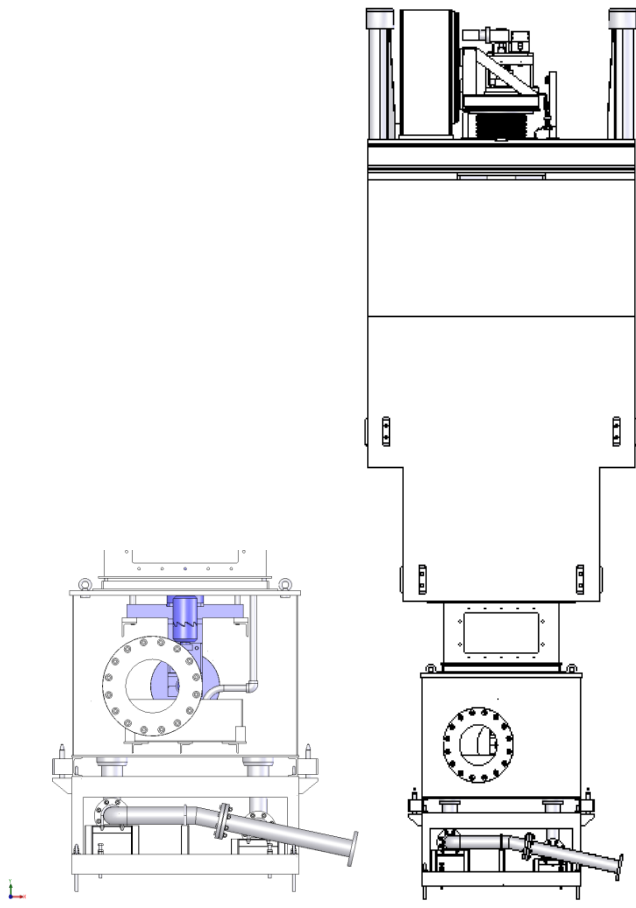
- SC-MIC is sandwiched by cooling tubes.
- Whole coil is impregnated by tin.

Actual Sized Indirect Cooling Test Coil (2500A SC-MIC)



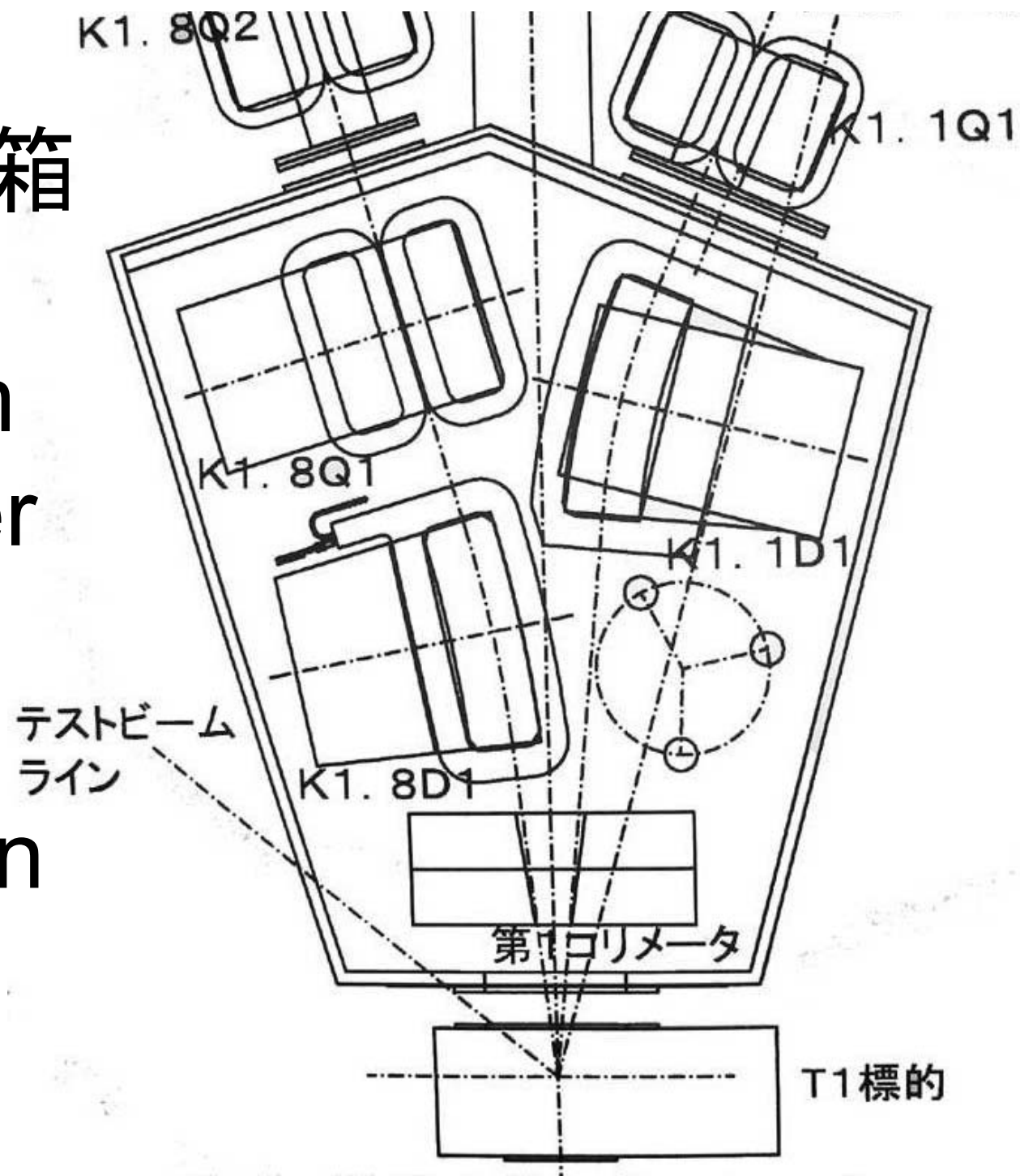
Indirect cooling coil before (left) and after (right) metal impregnation.

T1 標的と五角形

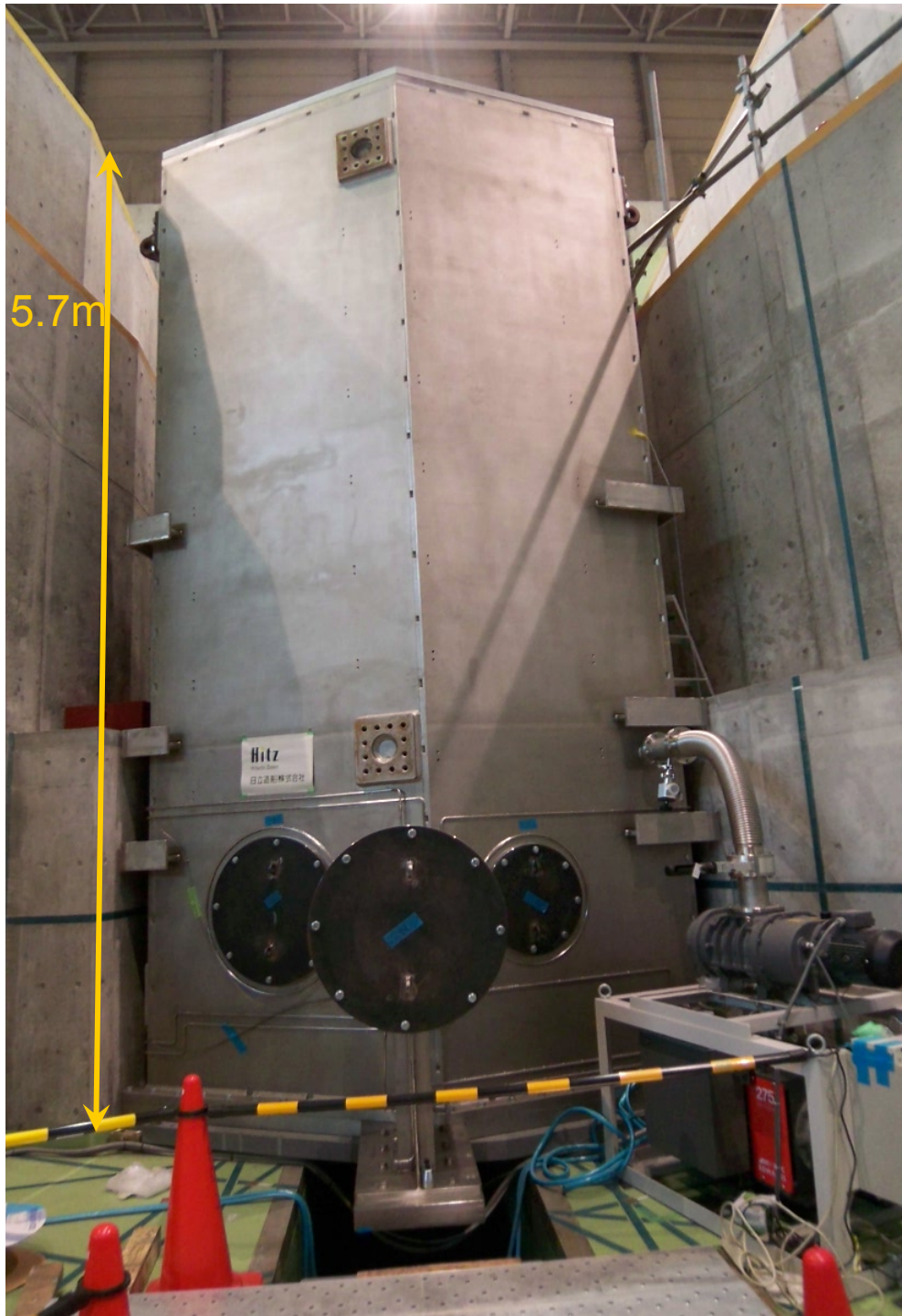


中央真空箱
Central
Vacuum
Chamber

The
Pentagon
五角形



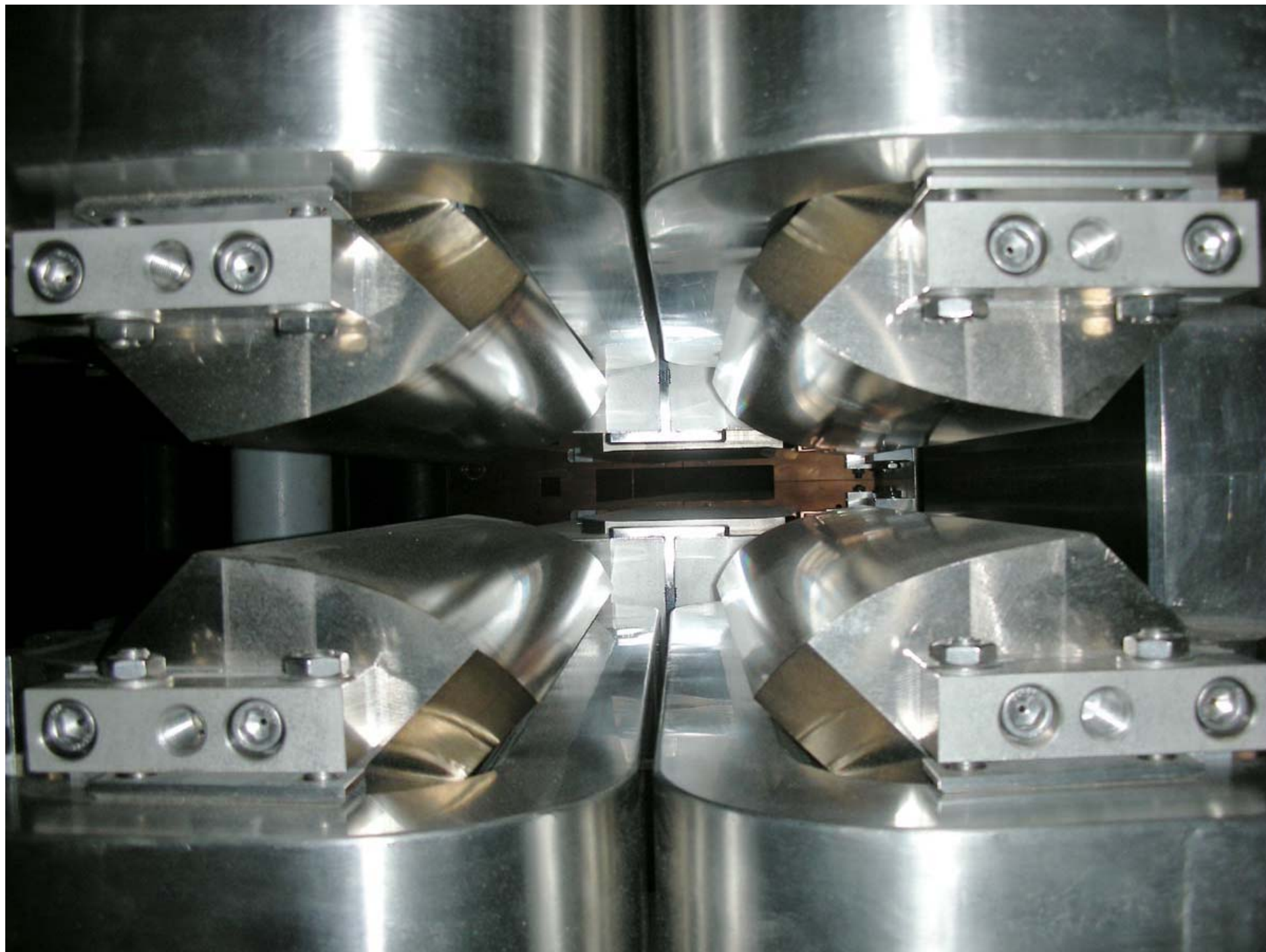
T1 vacuum chamber and all inner modules were installed

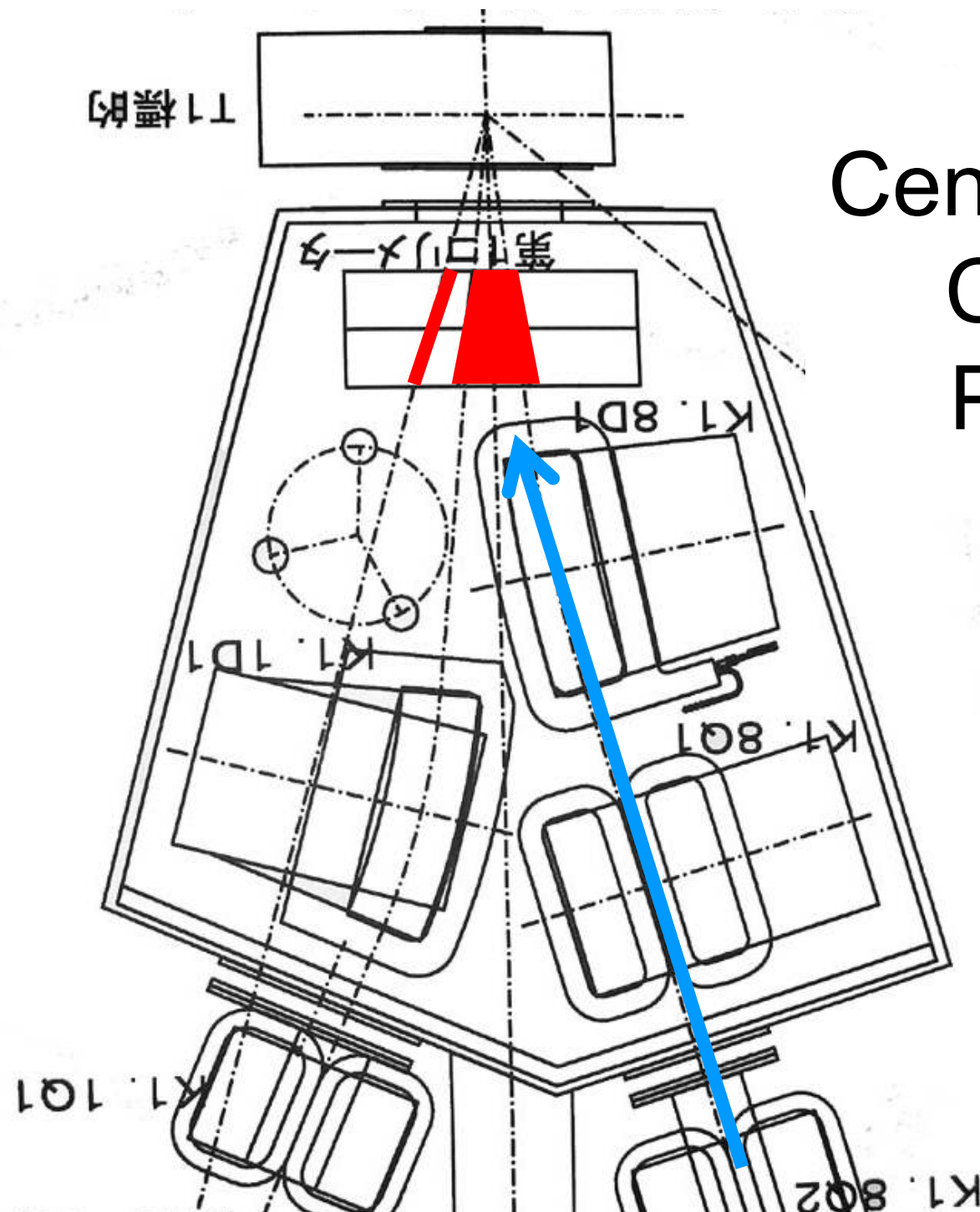


K1.8D1 magnet was assembled and installed into T1 vacuum chamber









Central vacuum
Chamber:
Pentagon

動画を見る

Small Tips for RR Magnets

Completely Mineral Thermo Switch

電取認定登録品 UL・C-UL認定品 VDE申請中 CCEE申請中

スナッパ-®
US-625

特長: 高温対応型, 小型高容量, セラミックボディタイプ
用途: 電子レンジ, 暖房機器, 給湯器 等

仕様

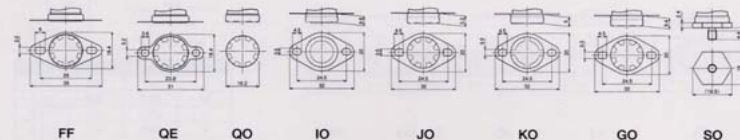
電気定格	AC125V MAX.15A 抵抗負荷 AC250V MAX.10A 抵抗負荷
温度設定範囲	50~250℃の一点温度選定
ディファレンシャル	15~30K
温度公差	150℃以下 動作温度±4℃/復帰温度±7℃ 151℃以上 動作温度±4℃/復帰温度±6%
回路抵抗(初期値)	50mΩ以下
絶縁抵抗	100MΩ以上[DC500Vメガーにて]
耐電圧	AC1,200V/1分間又はAC1,500V/1秒間
耐熱性	290℃
耐寒性	-20℃
開閉耐久性	10,000回以上[定格負荷にて]

※微小電流用[金接点タイプ]もございます。

モデルコード

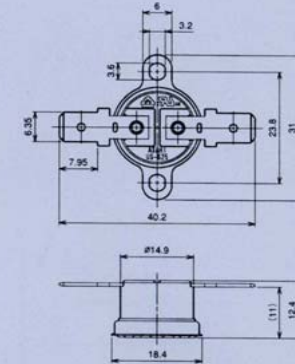
US-625	□□□□
カバー材質	FF: ステンレス鋼・表面型 QE: アルミニウム・表面型 QO: アルミニウム・ホルダーなし
ホルダー型式	IO: ステンレス鋼・埋込型[埋込深さ 4.6mm] JO: ステンレス鋼・埋込型[埋込深さ 5.2mm] KO: アルミニウム・埋込型[埋込深さ 5mm] GO: アルミニウム・埋込型[埋込深さ 5.4mm] SO: 黄銅・ネジ取付型
端子型式	L: ポジティブロックコネクター250シリーズ相当品 M: ポジティブロックコネクター187シリーズ相当品
端子角度	R: 水平端子 T: 垂直端子
接点型式	X: 温度上昇により"OFF" Y: 温度上昇により"ON"
用途型式	A: 標準ケース P: 4ポストケース

ホルダー形式



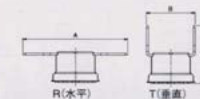
US-625AXRLQE

外形寸法図



UL・C-UL・VDE・CCEE認定の型式・仕様は
上記と一部異なる点がありますので、明細はお問合せ願います。
US-625は、US-624の代替となります。
本仕様を超える仕様については別途ご相談下さい。

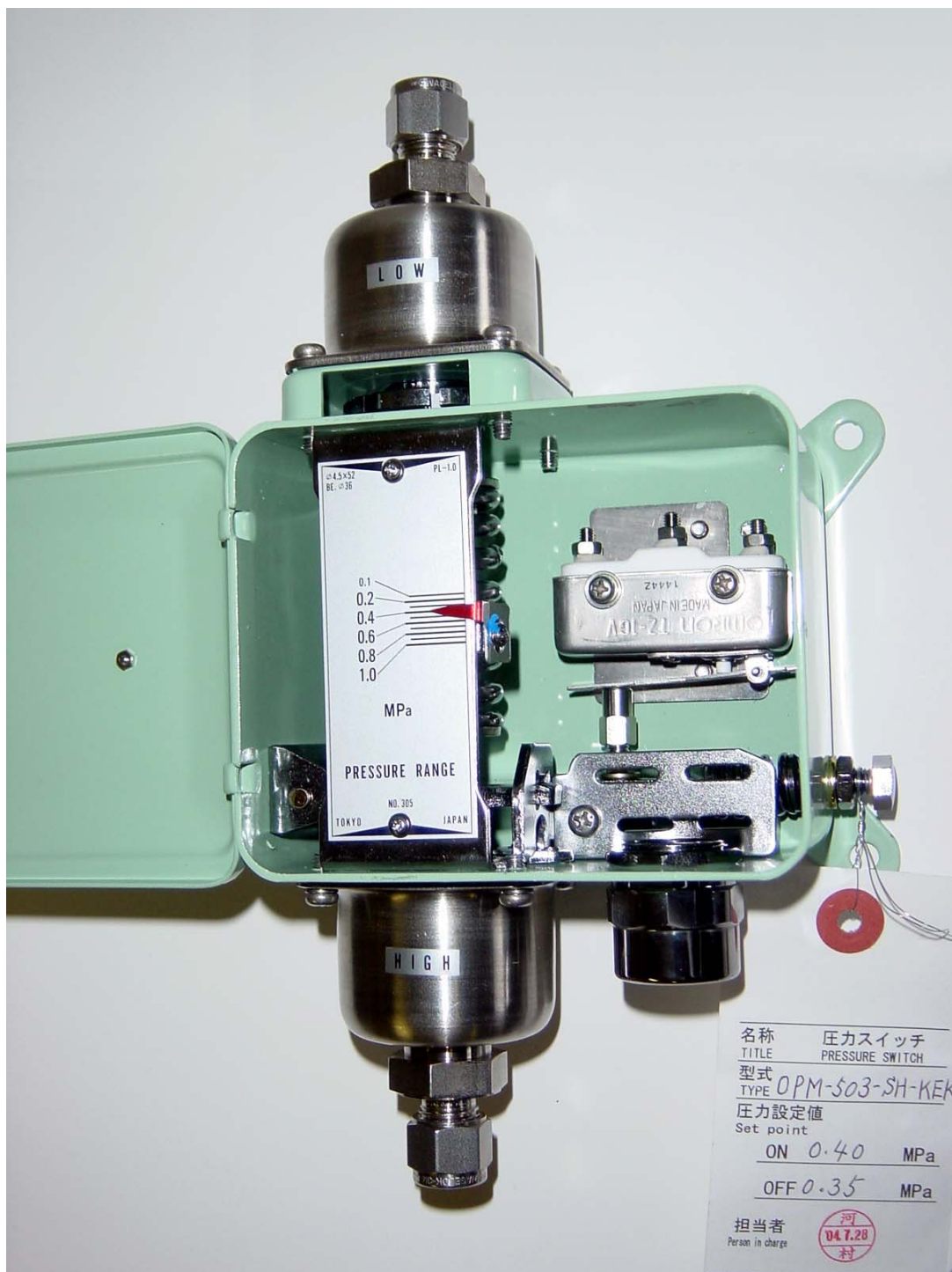
端子型式・端子角度



端子型式	A	B	C
L	40.0	19.0	23.5
M	36.0	19.0	21.0

[単位:mm]

Full Metal Pressure Switch



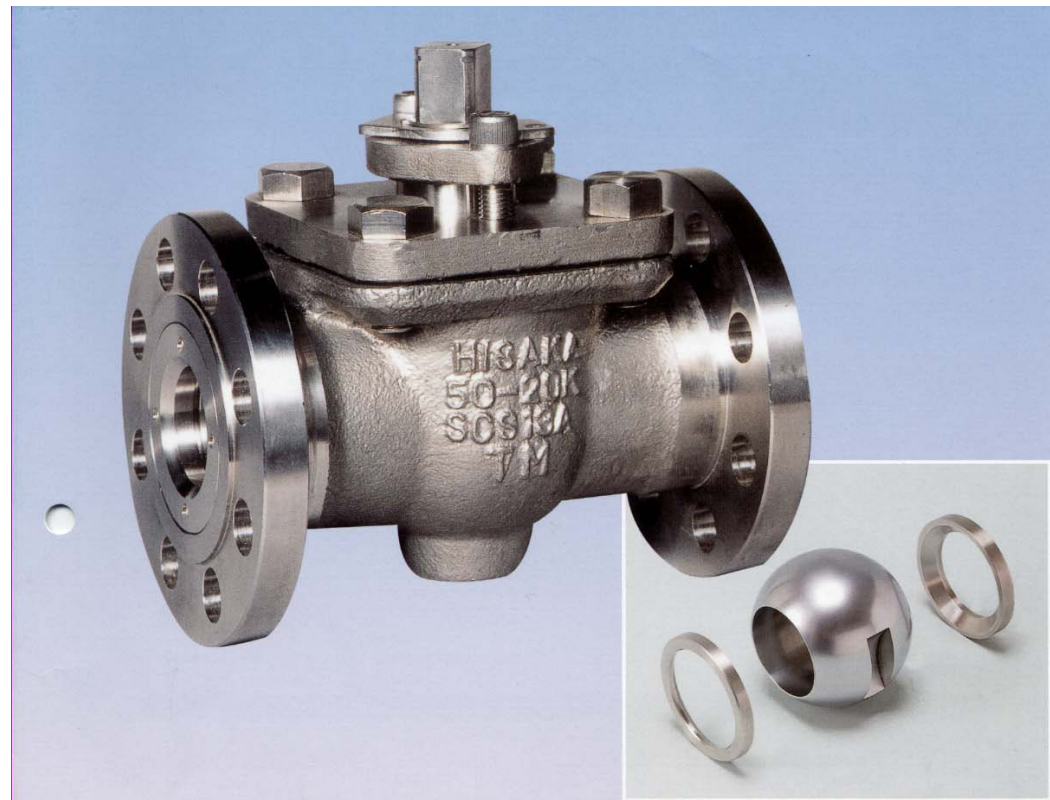
Ceramic Micro Switches



オムロン形TZ 高温用基本スイッチ

- ◆絶縁物にセラミック、ばね材料にCo系特殊合金を、さらに接点に特殊合金を使用し、高温雰囲気中での動作、および接触信頼性を確保。
- ◆400℃の高温でも安定した動作が可能。

Full Metal Valve



HF3(M3)・DK3(M2)・TM ・メタルシートボールバルブ

フローティングメタル(1WAY)	■ HF3(M3R)・HF3(M3M)・HF3(M3H)
トラニオンメタル(2WAY)	■ DK3(M2)
トラニオンメタル(2WAY 高温用)	■ TMM・TMH

HISAKA WORKS, LTD.

Cat No M3-1004

GRAFOIL for Water Seal



Ceramic Insulation Tube

セラミック気密端子 チタン活性ろう付 冷却水用絶縁パイプ(TTSシリーズ)



共同開発先：文部科学省

高エネルギー加速器研究機構

● 特徴

- ・セラミックのメタライズにチタンを採用し耐水性の信頼を高めています。
- ・全部品を無機物で構成しています。
- ・優れた耐熱性、耐放射線性を有します。

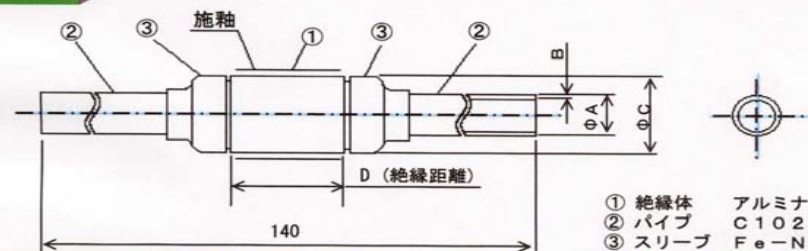
● 用途

- ・電磁石用冷却水絶縁パイプ。
- ・冷却水、ガス回路等の絶縁。

● 仕様

- ・気密性： $1 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s}$
(於 ヘリウムリークデテクタ)
- ・耐電圧：下表
(於 大気圧下 1分間印加)
- ・絶縁抵抗：1000MΩ
(於 常温・常湿 DC1,000V印加)
- ・耐熱性：350℃ (温度勾配15℃/分以下)
- ・耐放射線性：100MGy以上

● 外形図



- ① 絶縁体 アルミナセラミック
- ② パイプ C1020 (無酸素銅)
- ③ スリーブ Fe-Ni (Niめっき付)

Catalog No.				寸法 (mm)				耐電圧
シリーズ	パイプ径	耐電圧	特殊仕様	φA	B	φC	D	(DC.V)
TTS	08	0.1	Ti	8	0.8	18.0	2.1	1,000
		0.2					4.1	2,000
	10	0.1		10	1.2	18.0	2.1	1,000
		0.2					4.1	2,000
	12	0.1		12	1.6	19.6	2.1	1,000
		0.2					4.1	2,000
	15	0.1		15	2.0	21.0	2.1	1,000
		0.2					4.1	2,000

ご注文例

シリーズ名 パイプ径 耐電圧 特殊仕様
TTS - 10 - 0.2 - Ti
(φ10) (DC2,000V) (チタン活性ろう付)

● 備考

- ・C1020 (無酸素銅) パイプをSUSパイプに変更できます。
- ・冷却水が触れる部分の材質は、MIL規格の「接触できる金属」で構成しています。右表

● 注意

- ・冷却水、ガスは腐食性の無いものをご使用ください。
- ・高放射線下でのご使用される場合、セラミック上の釉薬に若干の絶縁抵抗低下が発生します。
- ・施釉無しも受けたまわります。

MIL規格「接触できる金属」抜粋 ↓ 接触可 ○ 貴 ● 卑			
Group No.	Metallurgical category	EMF (volt)	compatible couples
3	silver	0	○
4	nickel plating titanium	-0.15	○ ○
5	copper silver solder	-0.20	● ● ○
6	yellow brasses	-0.25	● ● ●

● お問い合わせ先

日立原町電子工業(株) TEL: 0294-23-2600

Email: eigyou@haraden.hitachi.co.jp

営業技術部

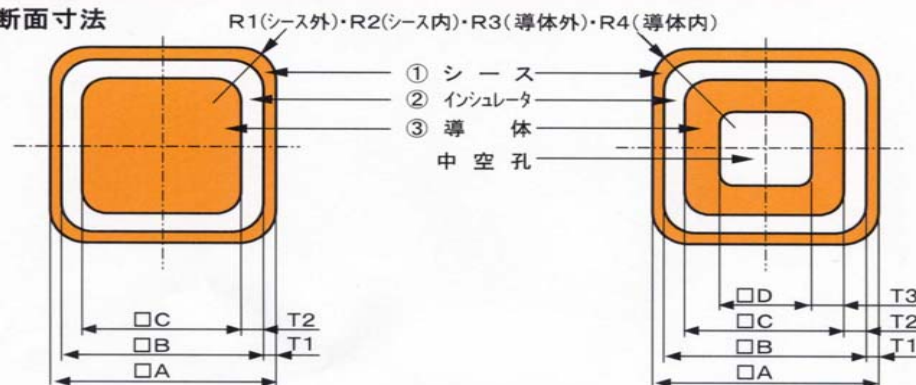
FAX: 0294-23-1350

ホームページ: <http://www.haraden.co.jp>

MIC

日立 無機絶縁導体 HITACHI Mineral Insulation Cable (MIC)

1. 断面寸法



仕 様			中実タイプ		中空タイプ		
寸法(mm)			MIHC-1000A-S	MIHC-2000A-S	MIHC-2000A-H	MIHC-2500A-H	MIHC-3000A-H
① シース	外径	A	14.0	18.0	19.8	23.8	28.0
	肉厚	T1	0.7	0.7	1.0	1.1	1.5
	外R	R1	1.2	1.2	2.0	3.0	4.0
	内R	R2	0.8	0.8	1.0	1.9	2.5
② インシュレータ	外径	B	12.6	16.6	17.8	21.6	25.0
	肉厚	T2	1.7	1.7	1.7	1.8	2.5
③ 導体	外径	C	9.2	13.2	14.4	18	20.0
	内径	D	—	—	10.0	10	10.0
	肉厚	T3	—	—	2.2	4.0	5.0
	外R	R3	2.6	2.6	2.5	4.0	3.0
	内R	R4	—	—	0.8	1.3	1.0
断面積 (mm ²)	① シース		36.6	47.8	72.6	95.3	150.6
	② インシュレータ		79.4	106.6	114.0	153.2	227.4
	③ 導体		78.8	168.4	101.4	208.8	293.1
	合 計		194.8	322.8	288.1	457.3	671.1
中空穴断面積 (mm ²)			—	—	99.5	98.5	99.1
単重 (kg/m)	① シース		0.327	0.427	0.649	0.852	1.347
	② インシュレータ		0.187	0.250	0.268	0.360	0.534
	③ 導体		0.705	1.506	0.907	1.867	2.621
	合 計		1.218	2.183	1.824	3.078	4.502
製造可能長さ (m)			60	60	60	60	30

2. 仕 様

品番・名称	仕 様	材 質	化学成分	硬度 (Hv1kg)	導電率 (%、20℃)
① シース		C1220-O	Cu 99.90%以上	40~50	-
② インシュレータ		MgO	MgO 98.0%以上	—	-
③ 導体		C1020-O	Cu 99.96%以上	40~50	100以上

3. 納入形態

外径φ1800程度のゼンマイ巻き

※「MIC」は、文部科学省 高エネルギー加速器研究機構・株式会社トーキン殿との共同開発品です

日立電線株式会社

土浦工場 技術部 TEL:0298-26-7426 FAX:0298-23-2442
茨城支店 伸銅営業課 TEL:0294-24-4821 FAX:0294-22-3049

まとめ

- 原子核・素粒子実験に用いられる電磁石の具体的な設計・製造方法について概説した。
- 放射線（や熱）の障害が大きい場所では、耐放射線電磁石を用いる。障害が深刻な場所では、完全に無機物で出来た磁石を使う。
- 磁場測定の方法として、NMRとホール素子を用いる方法を概説した。
- 現場を見たときに、自分が何を見ているか？をじわじわと考えましょう。