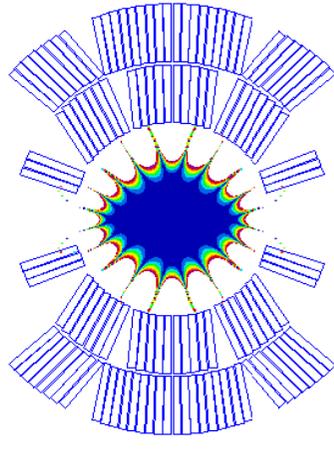
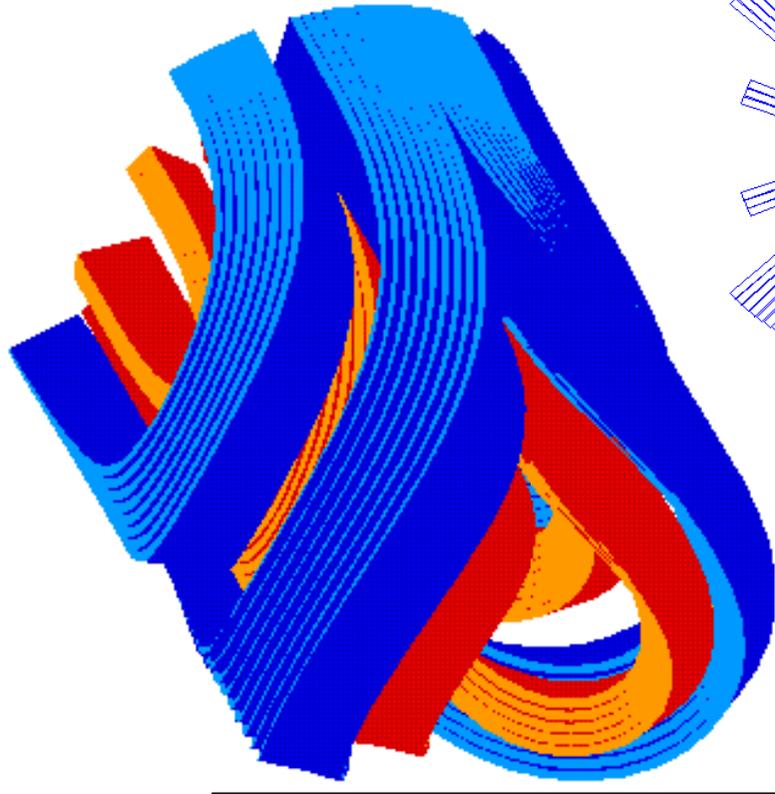
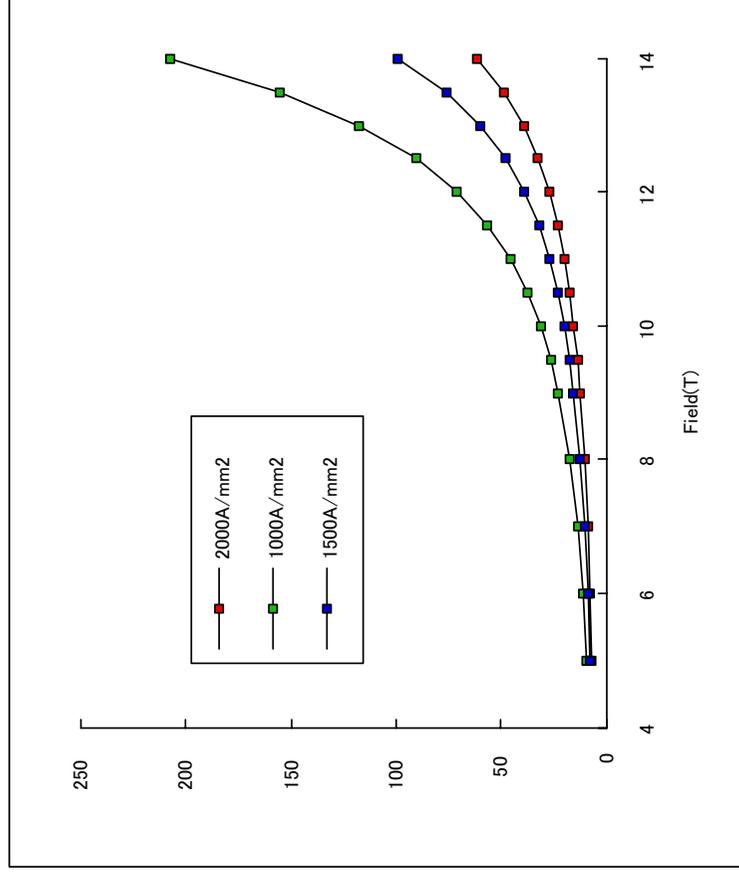


Nb₃Sn超伝導線材の高電流密度化

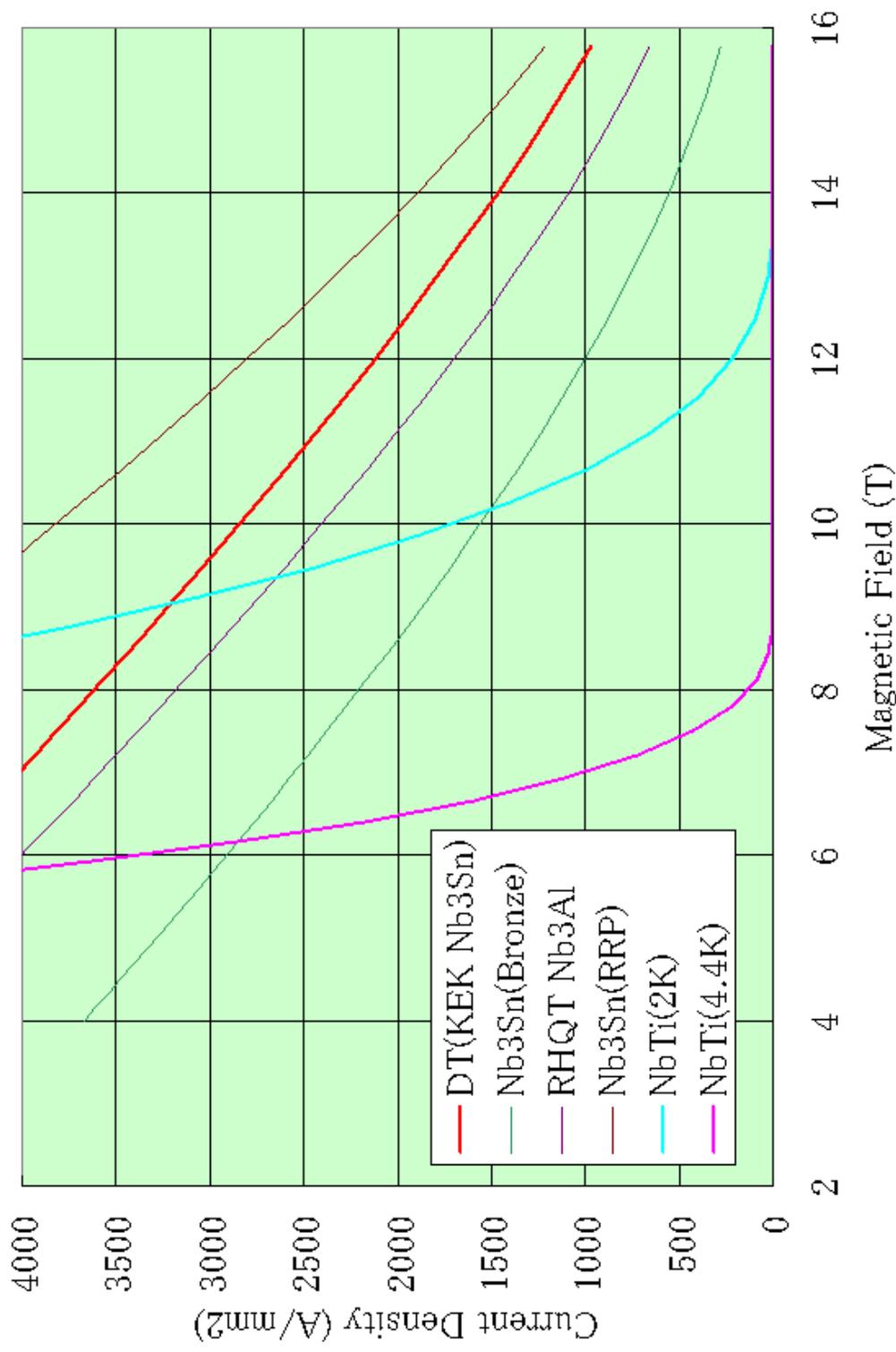
KEK 和気正芳

加速器磁石には高電流密度が必要

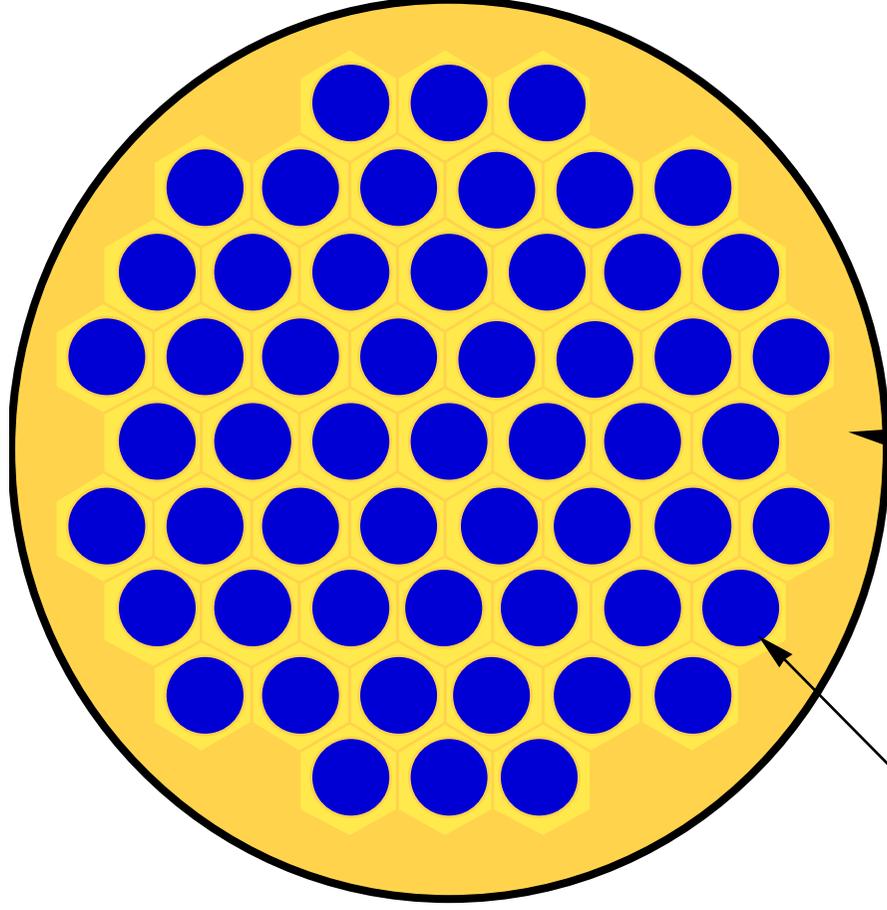
- 1) 磁石は長いが開口は小さい
- 2) kA/\$が大切



Conductor Current Density



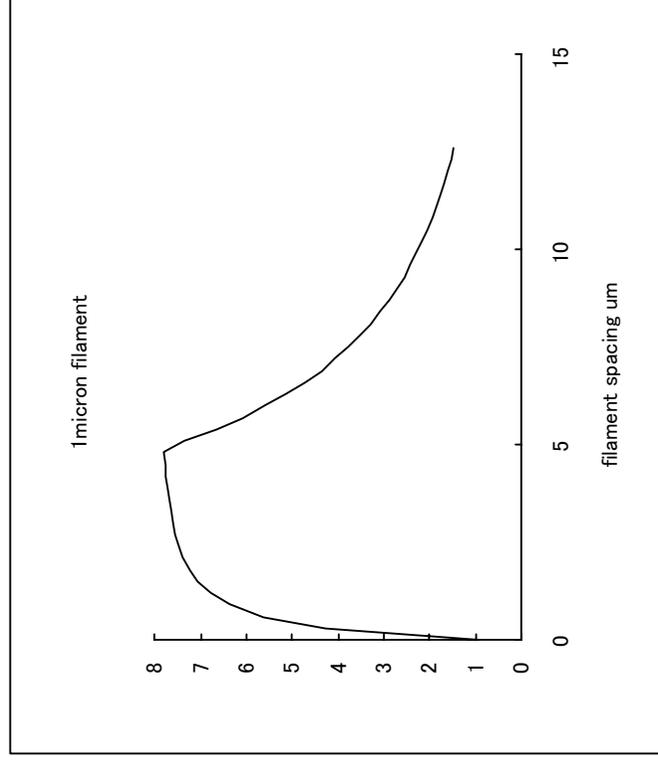
Limitation of Bronze Method



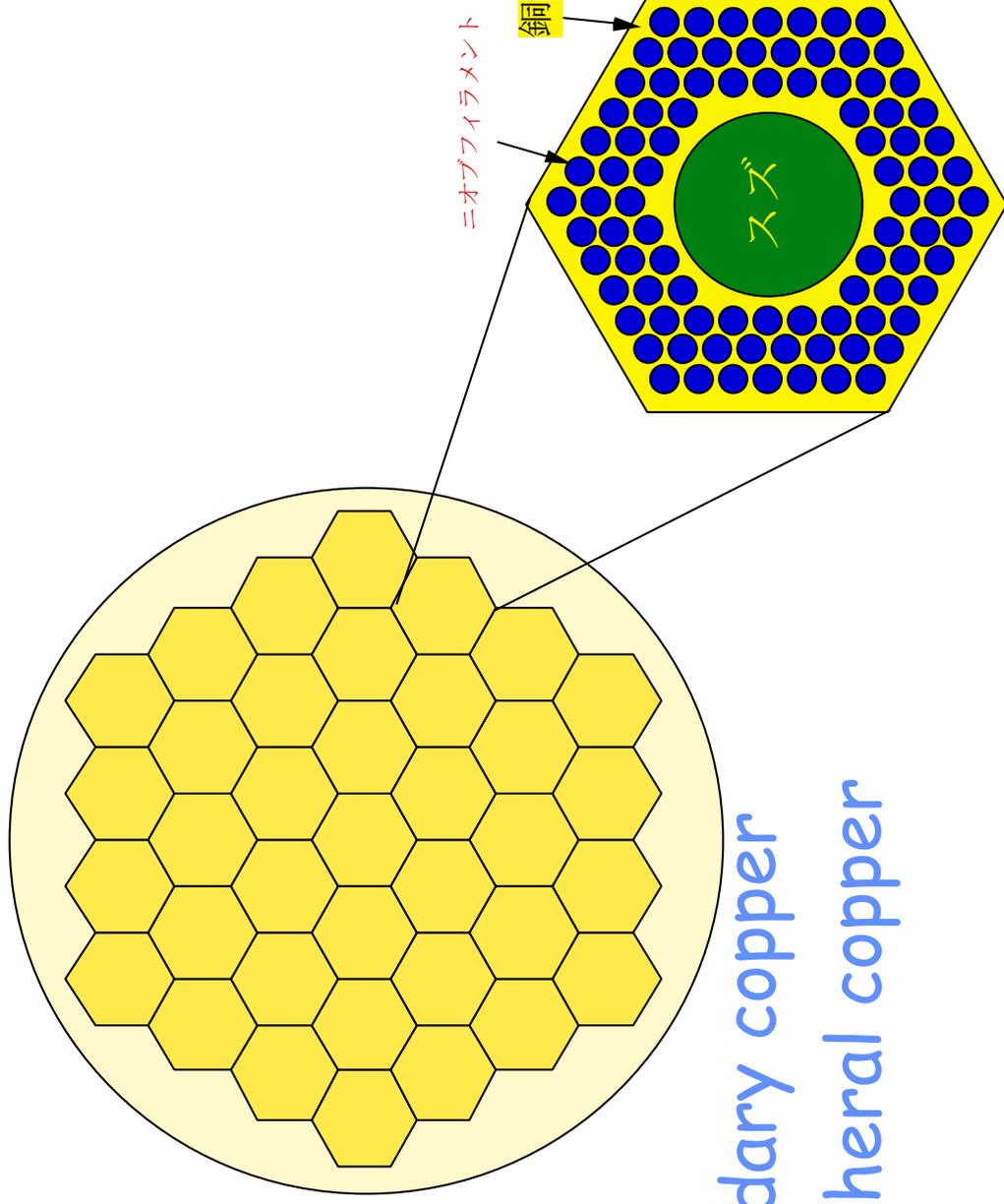
ニオブファイラメント

ブロンズ

- Limitation in tin supply



Internal Tin N3Sn Conductor

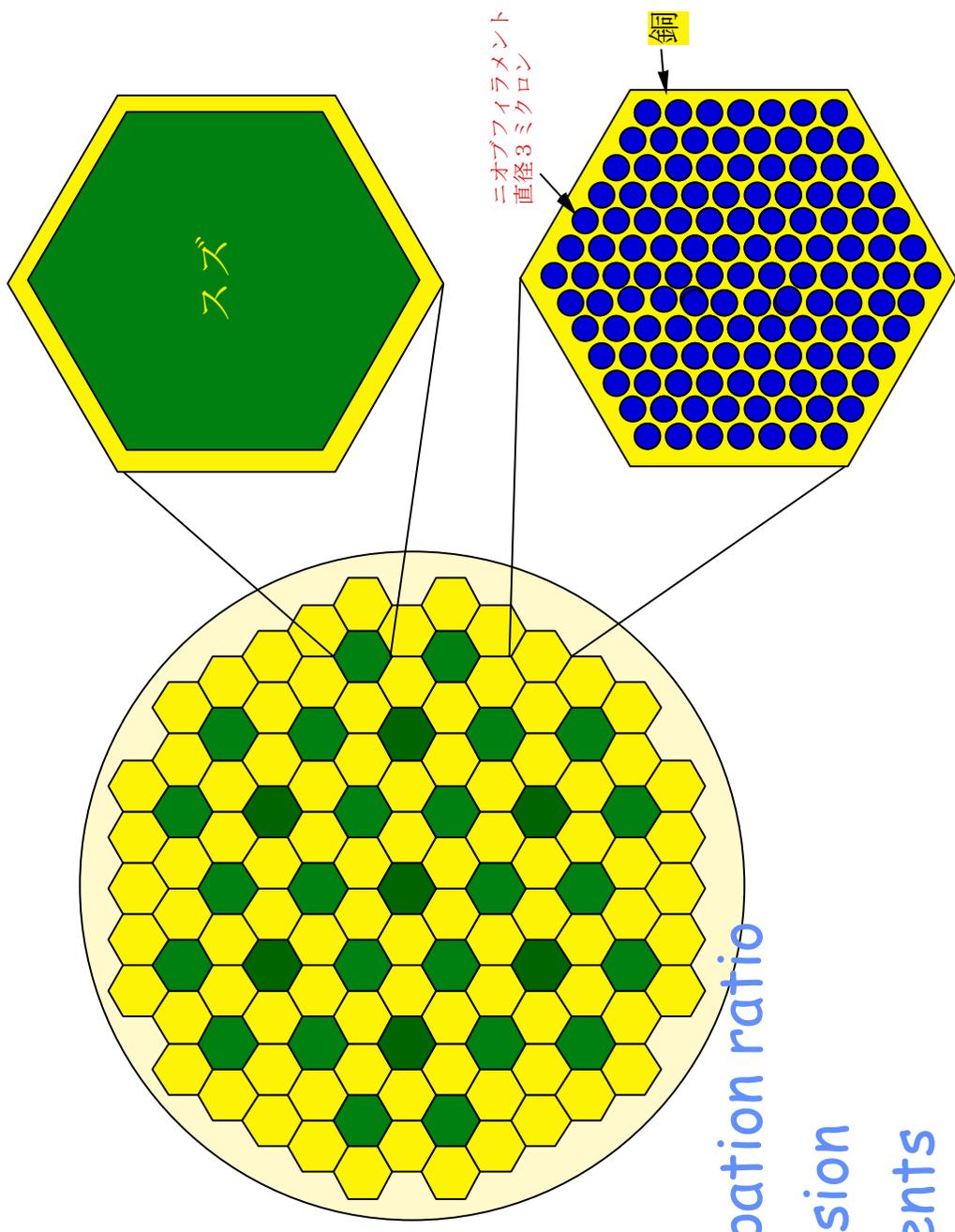


- Boundary copper
- Peripheral copper

どうすれば電流密度が上がるか？

- 2000A/mm²のためにやるべき改良
 - ◆ 占積率の改善—無駄なスペースを減らす
 - ◆ 確実なのはフロンス化する銅を減らすこと
 - 電流が流れない部分—安定化にも役立たない
 - スズを吸収する部分
 - スズの拡散の妨げになる部分
 - ◆ (スズ濃度を高める)

Distributed Tin (DT)

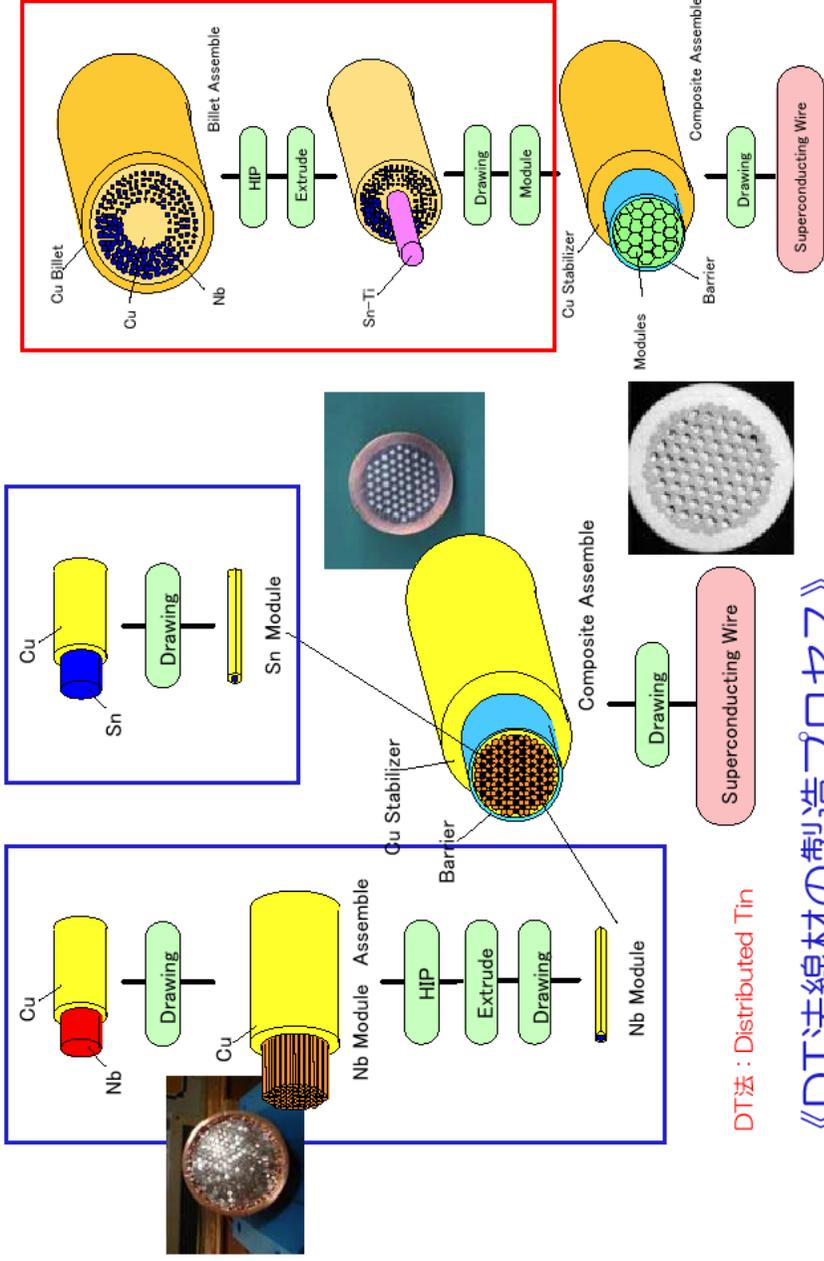


- Good occupation ratio
- Even diffusion
- Fine filaments

Method Comparison

	bronze		individual		overall		FIT	DT
	internal	Sn	internal	Sn	internal	Sn		
non copper diameter	700	700	700	700	700	700	700	700
overall barrier thickness	10	0	0	10	10	0	0	10
overall skin thickness	2	2	2	2	2	2	2	2
number of modules	121	121	121	121	121	121	121	121
module skin thickness	2	2	2	2	2	2	2	2
module barrier thickness	0	2	2	0	0	6	6	0
region skin thickness	0	2	2	0	0	2	2	0
Sn diameter or dimension	63.58	27.68	27.68	28.28	28.28	28.73	63.58	63.58
Sn skin thickness	0	2	2	2	2	2	0	0
filament region copper ratio	4.296	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Nb or tin module ratio								0.75
Nb3Sn occupancy rate	0.185	0.413	0.413	0.461	0.461	0.496	0.522	0.522
Nb/usableSn	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00

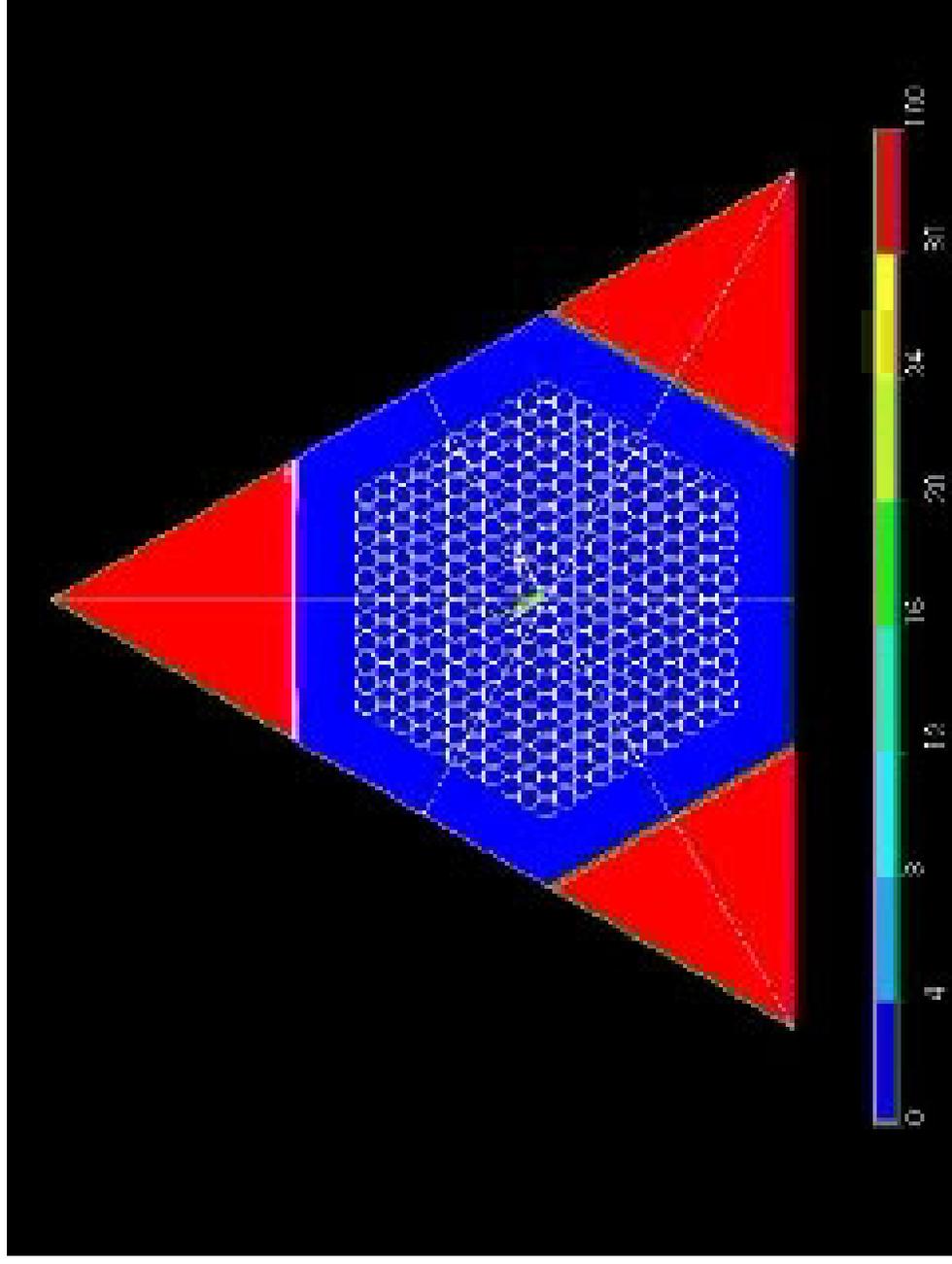
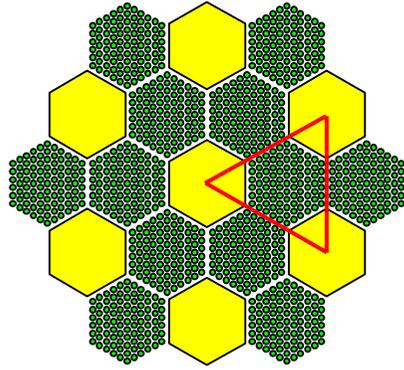
DT Conductor Production



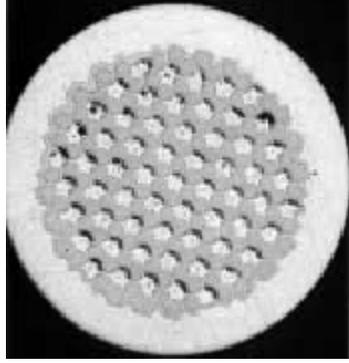
DT法 : Distributed Tin

《DT法線材の製造プロセス》

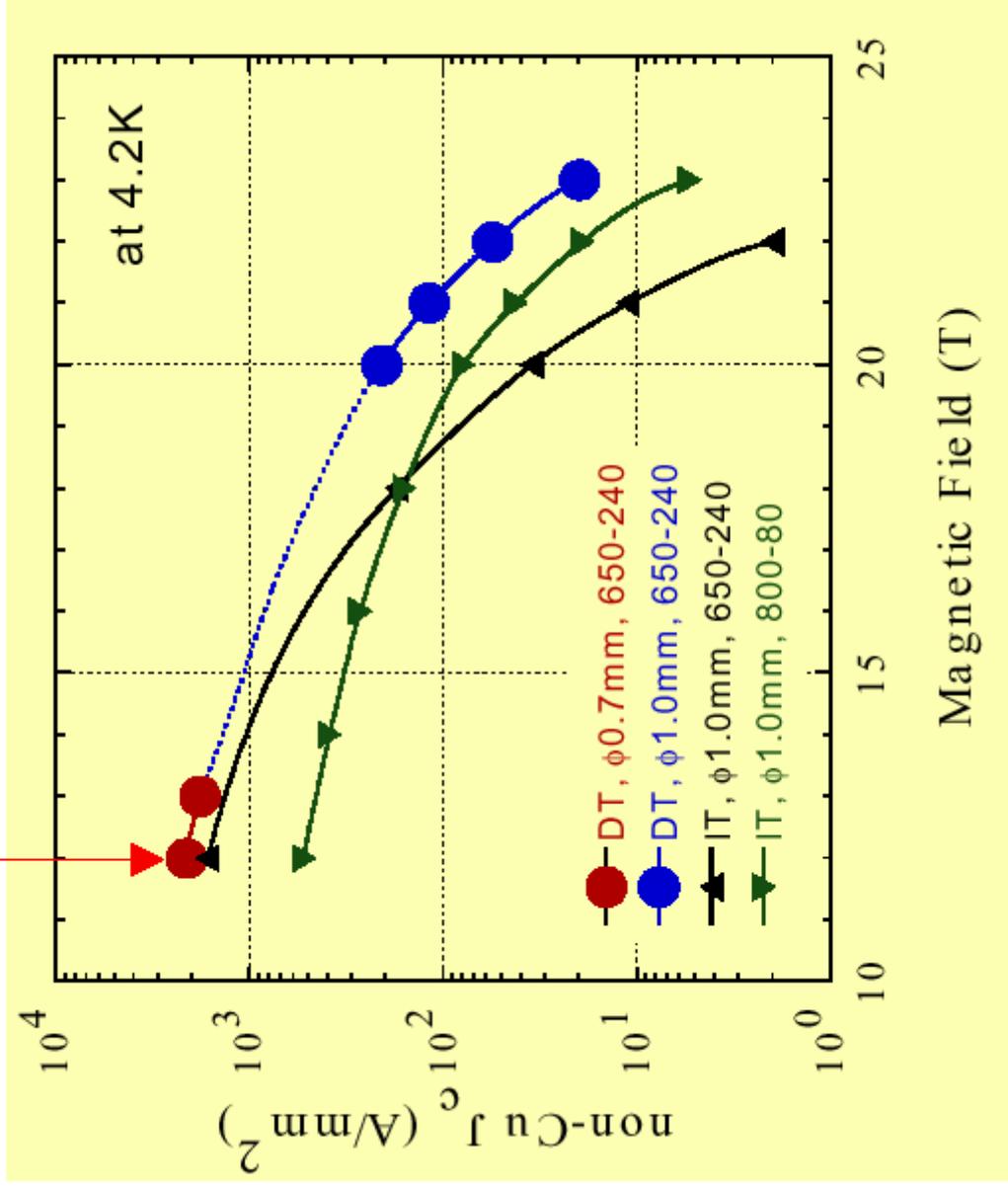
Nb₃Sn Reaction



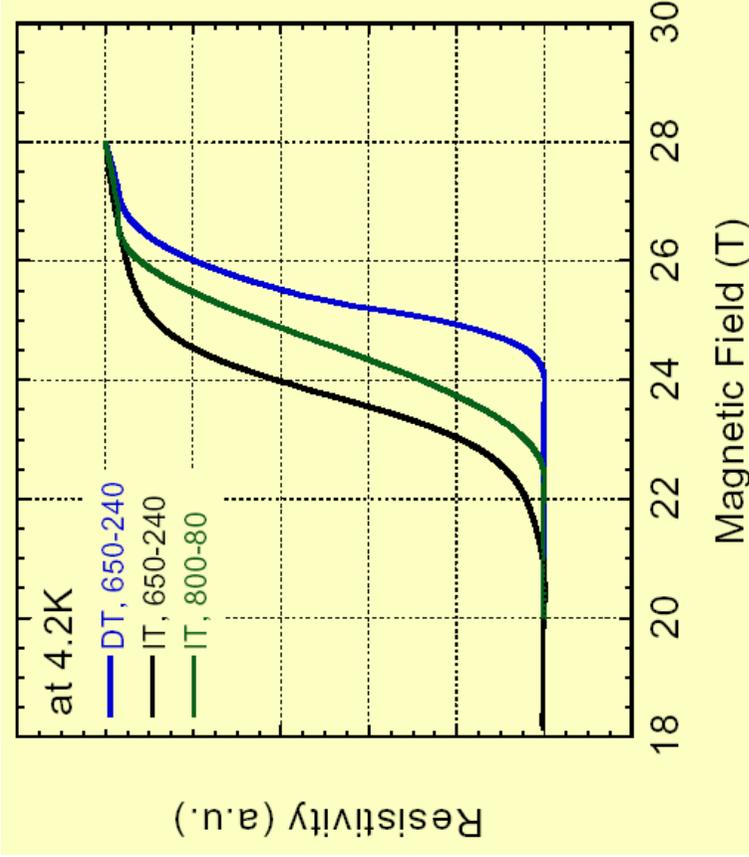
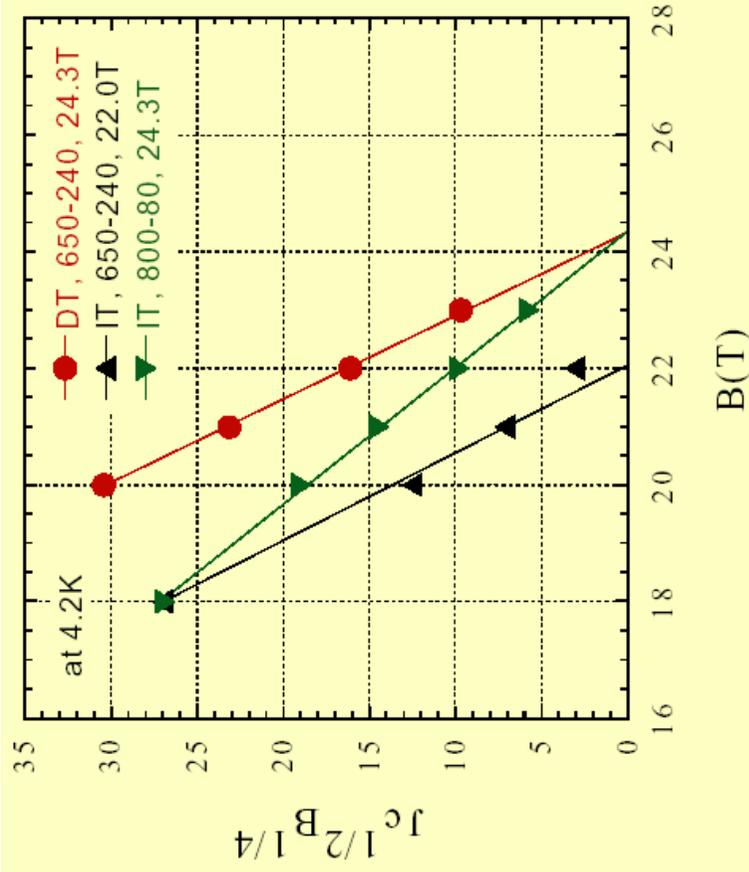
B-Jc Characteristics



$J_c = 2120 \text{ A/mm}^2$ (@4.2K, 12T)

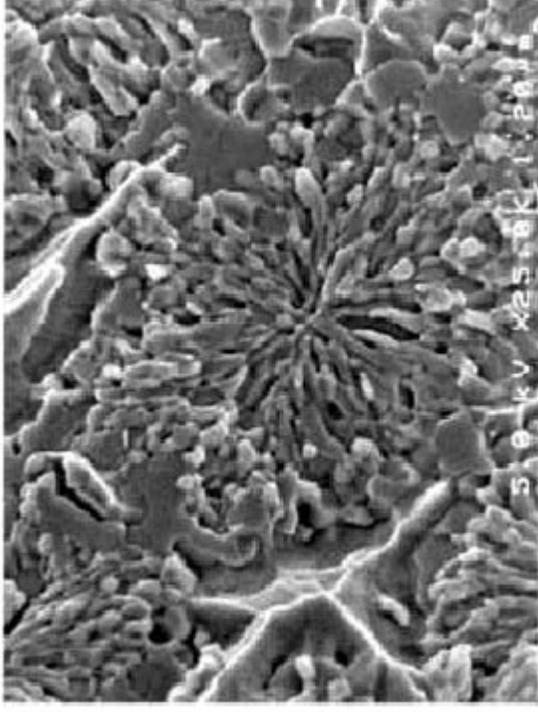


Bc2 Characteristics

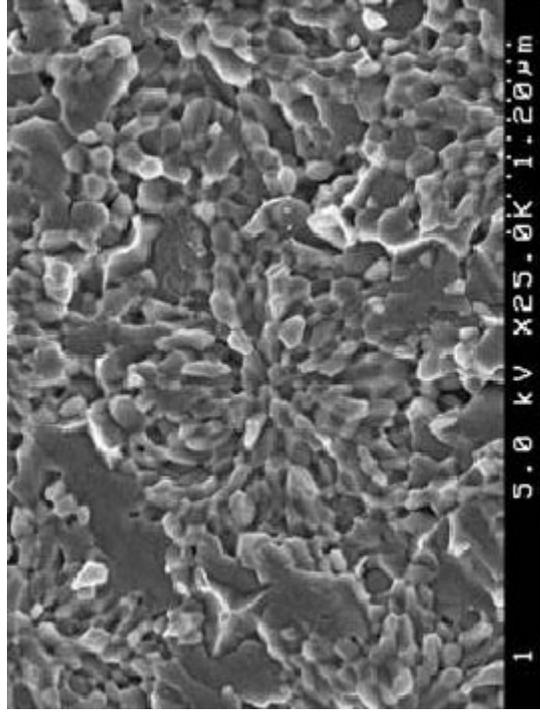


Grain size Observation

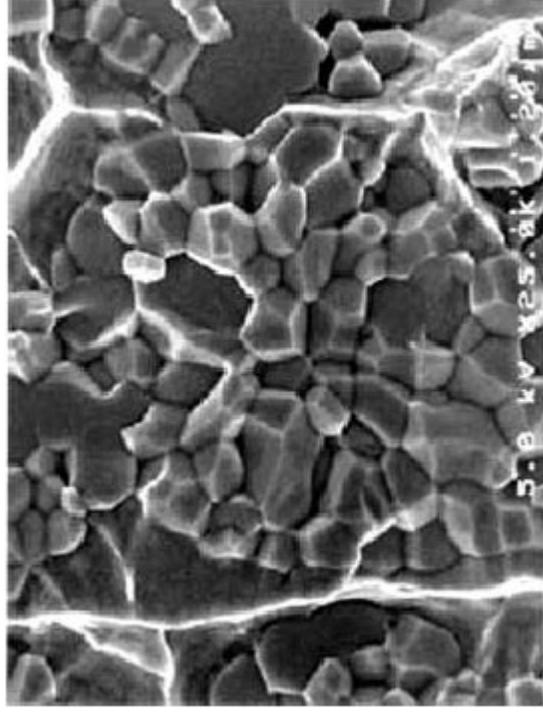
- IT->column/large
- DT->small



650°C-240hrs, GS_L~500nm/GS_S~100nm



650°C-240hrs, GS~200nm



775°C-80hrs, GS~460nm

Development of DT Conductor

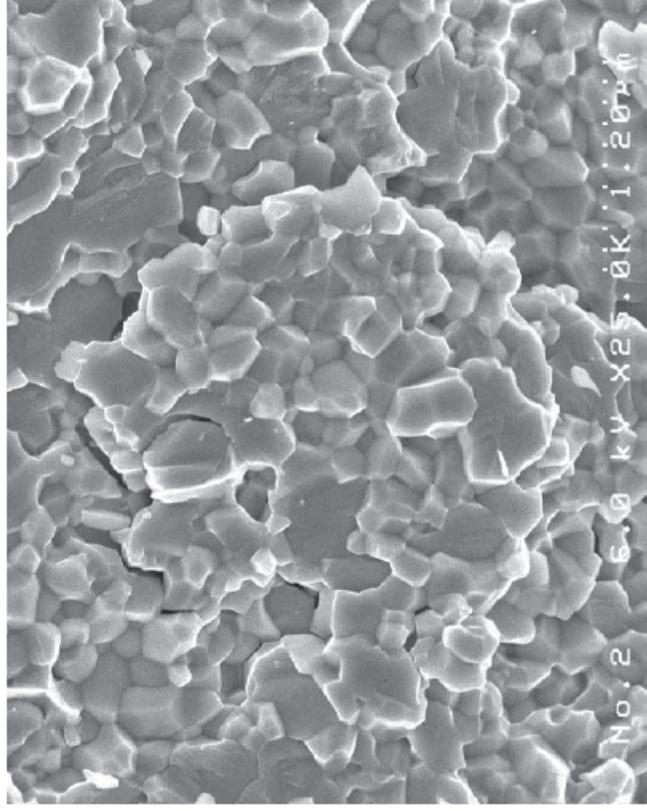
	Positive Expectation	Negative Expectation	Good news	Bad news
DT1	High purity Niobium	Wrong geometry with available material		Wrong geometry with available material
DT2	High purity Niobium	Not enough annealing	Low temperature annealing worked High Jc achieved	Workability still poor Large magnetization
DT3	Enough annealing	Low purity niobium		Difficulty in drawing
DT4	High purity Nb Split n Nb bundle	Indium addition	Good workability	Reduced Jc
DT5	Copper instead of indium in Sn		Reduced magnetization at 0.7mm	Not enough Jc Still unstable

Why the J_c not improved?

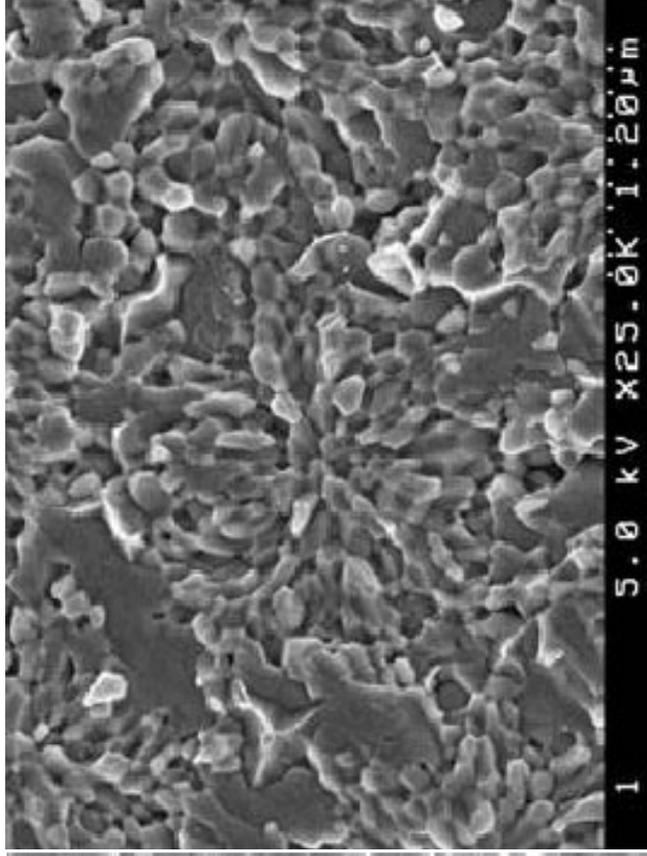
DT2	none	2120A/mm ²
DT4	indium	1917A/mm ²
DT5-1	Copper	1923(2002)A/mm ²
DT5-2	Indium	1936A/mm ²

- もし、DT4の J_c 低下がIndiumによるものならば、少なくともDT5には差異が見られるはずだ。
- DT2以来、断面観察が充分でなかった。

SEM写真の比較



DT5-1

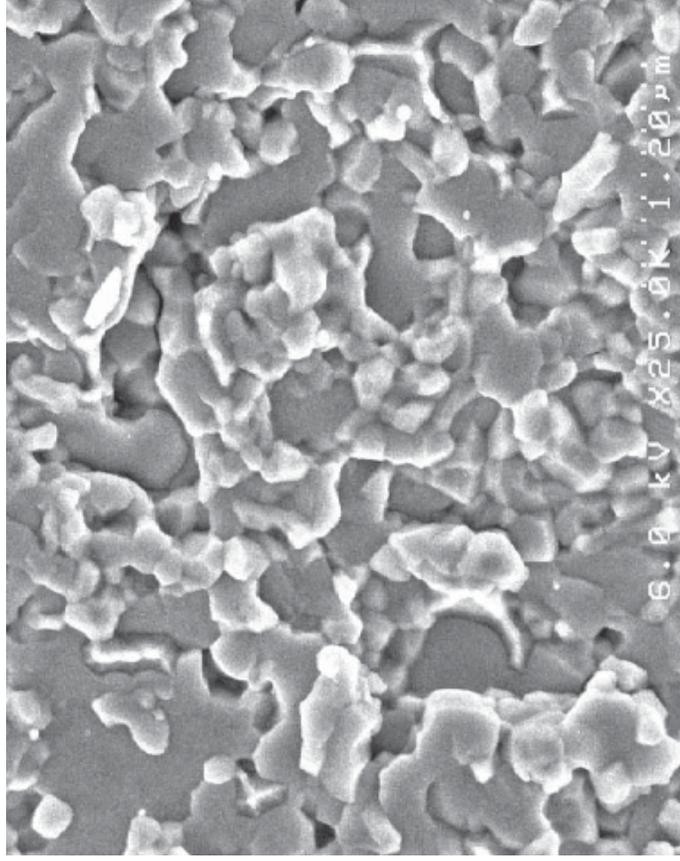


650°C-240hrs, GS~200nm

DT2

- 同じ熱処理で明らかにグレインが大きい
- 中心に向かうグレイン成長パターンが見えな
い

630Cでのグレイイン



DT5-1

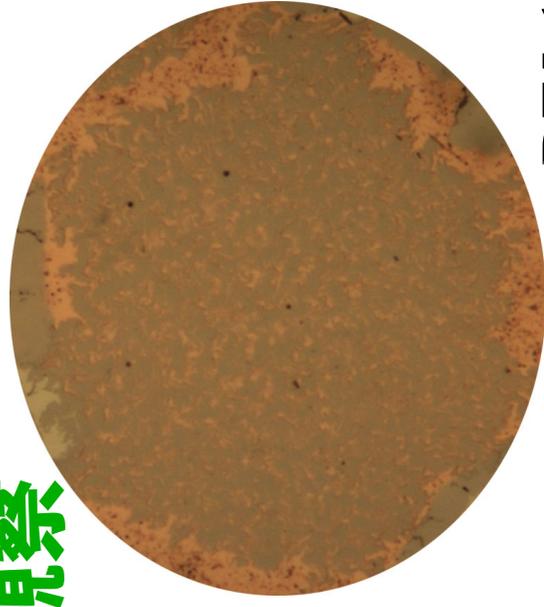
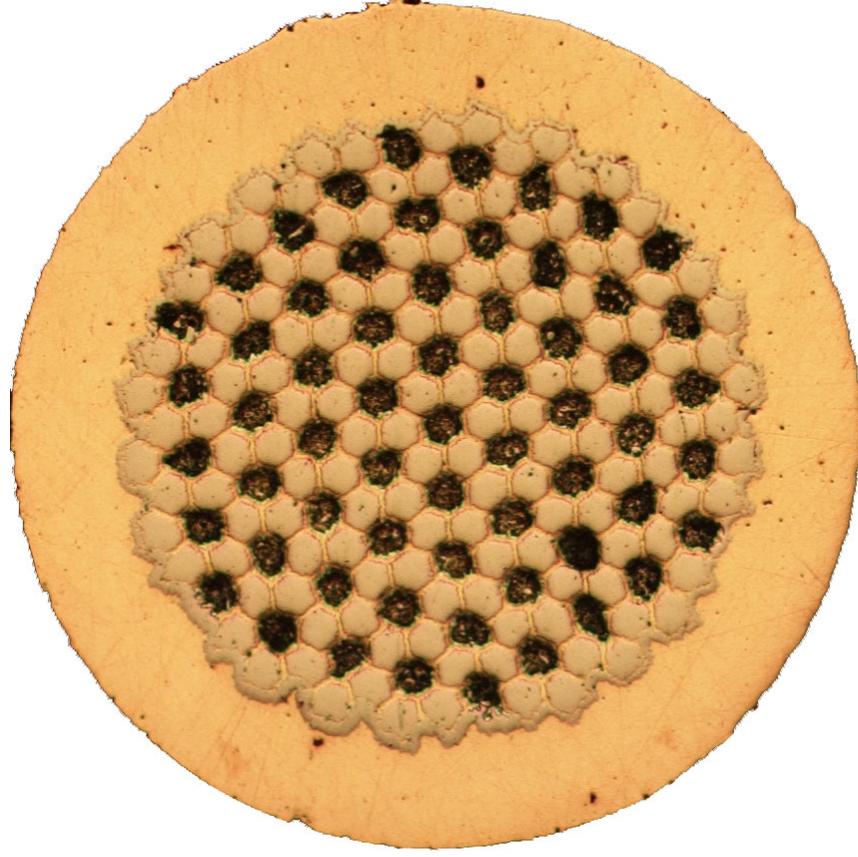
Oxford-RRP

- フィラメント中心へのパターンはRRPでも見える
- DT5-1の場合フィラメント境界すら明らかでない

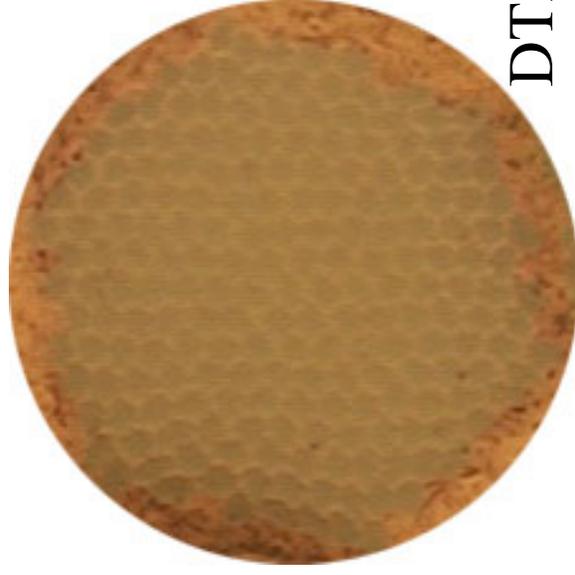
DT法線材の光学顕微鏡観察

- DT2線材はニオブモジュール中のファイラメントを見ることが出来る。モジュールがファイラメントで出来ていることがはっきりと見て取れる。
- DT法線材のファイラメント径は3ミクロン程度になり、光学顕微鏡による観察はなかなか難しい。サンプルの磨き方に大きく左右されるからである。しかし、これまでのDT法線材を比較してみるとどうもニオブモジュールの内部に違いが見られるようである。

ニオブモジュールの観察



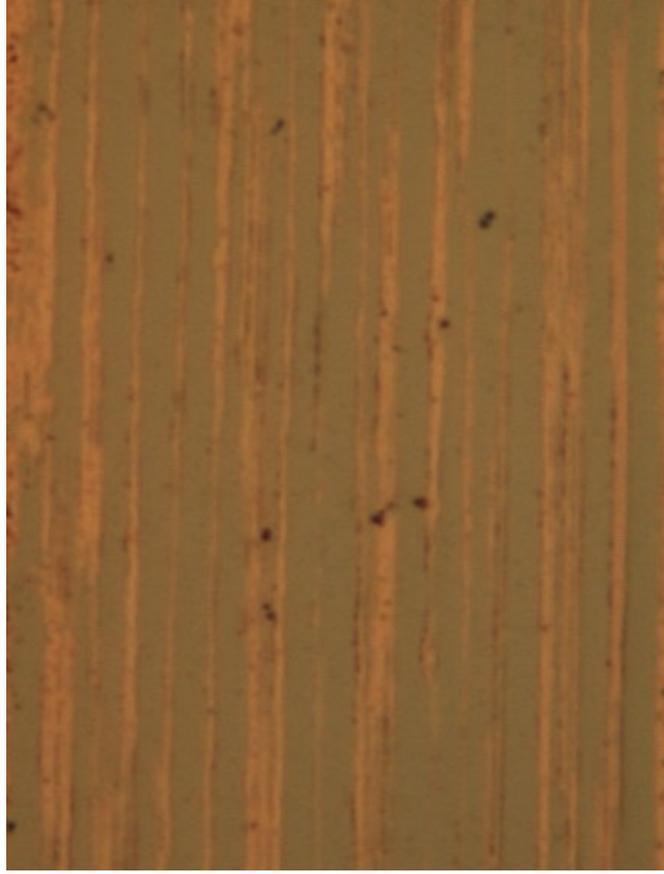
DT5-1



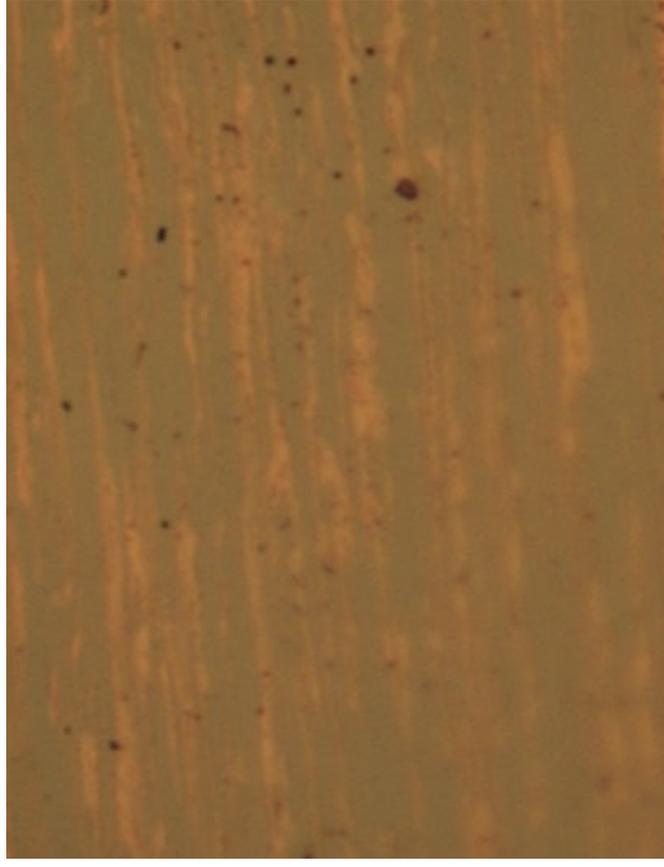
DT2

横断面の形状

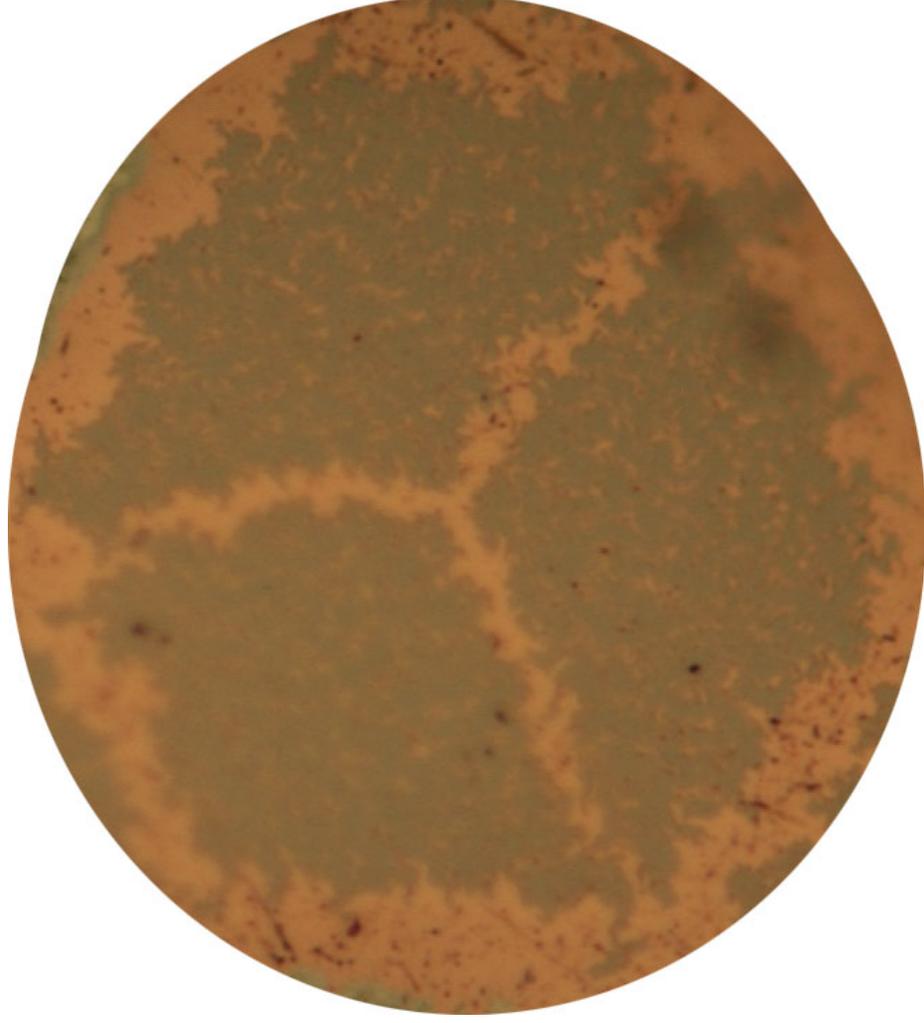
DT2



DT5



DT4もDT2と同じ

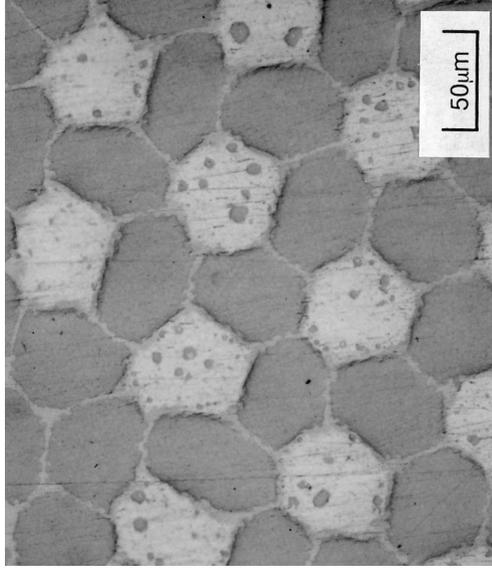


電流密度低下の原因

- インジウム添加は電流密度低下の原因でない
- ニオブフラメントのくずれが原因
- ニオブモジュールの取り扱いが重要
 - ◆ アニールのタイミング-オーバーアニリング
 - ◆ ワークビリティの良さでは判断できない
 - ◆ フラメントはスタビライザーに直接触れていないのでフラメントのくずれは致命的

静水压押し出しによるDT法線材

- 三菱→日立
- 硬度差に強い
- 銅被覆なしで押し出し
- 第一回試作押し出しに成功
- 試験設備をKEKに整備する必要

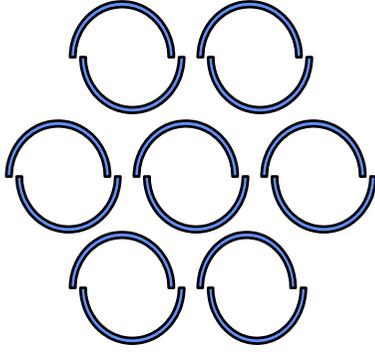


高電流密度線材の現状

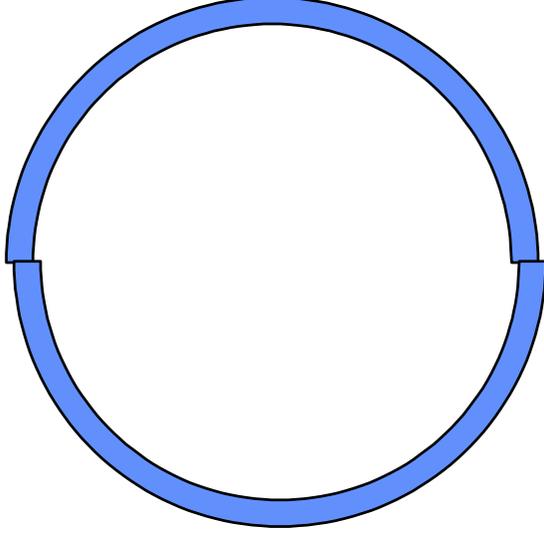
- RRP
 - ◆ 2900A/mm² Deff=50 RRR=30
 - ◆ 2300A/mm² Deff=50 RRR=100
 - ◆ Degradation after cabling
- PIT
 - ◆ 2000A/mm² Deff=50 RRR=10 tin leaks
 - ◆ 1800A/mm² Deff=50 RRR=100
 - ◆ Degradation after cabling
- Nb3Al

Tin Leaks due to Cabling

PIT / RRP



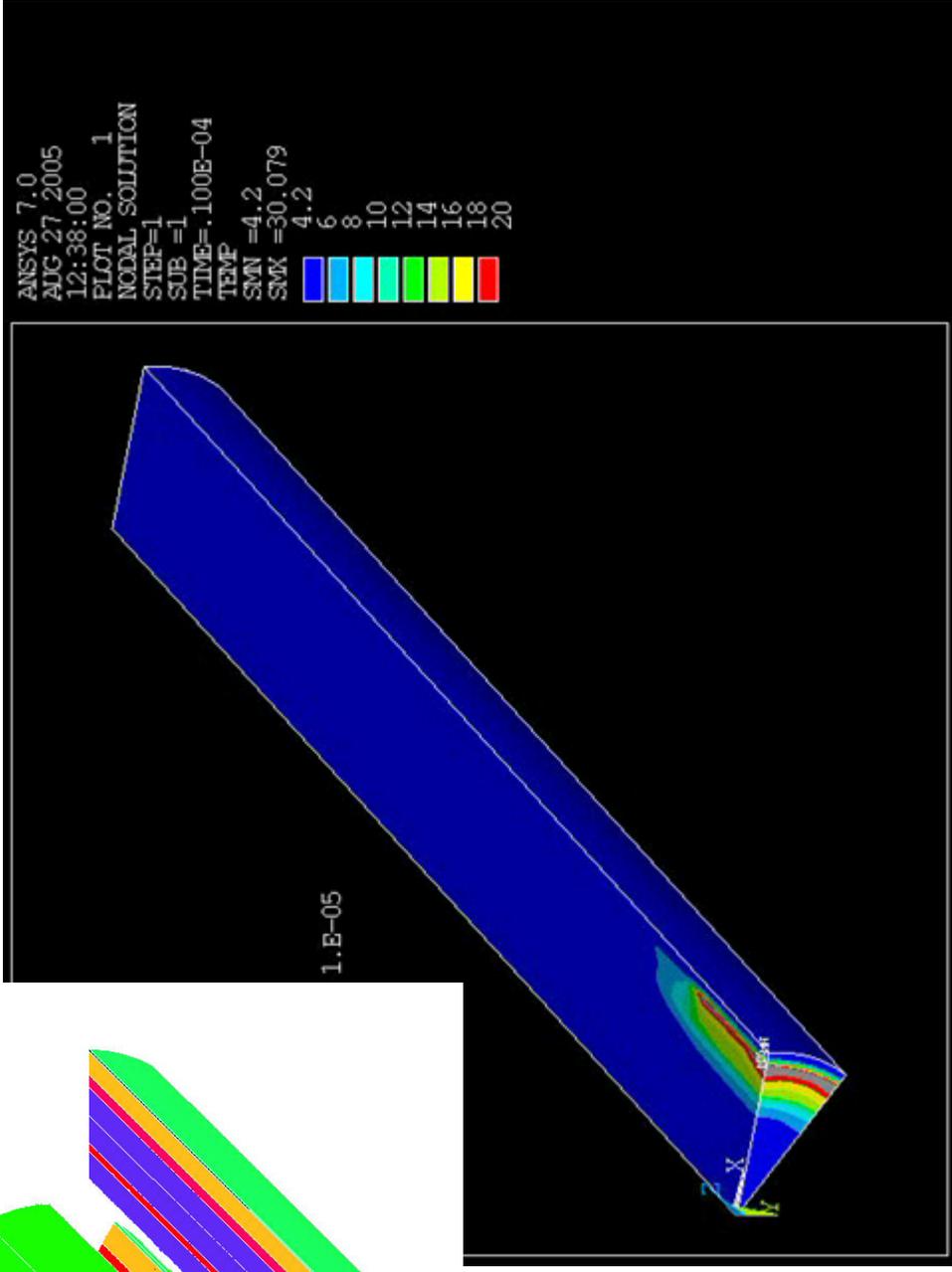
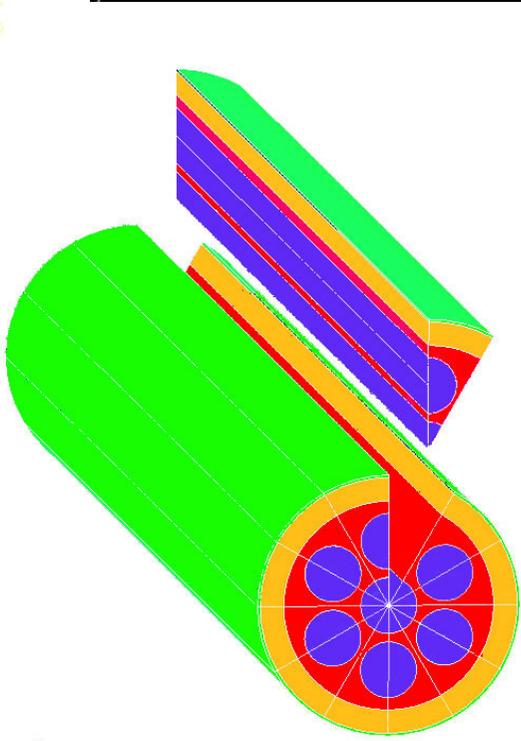
DT conductor



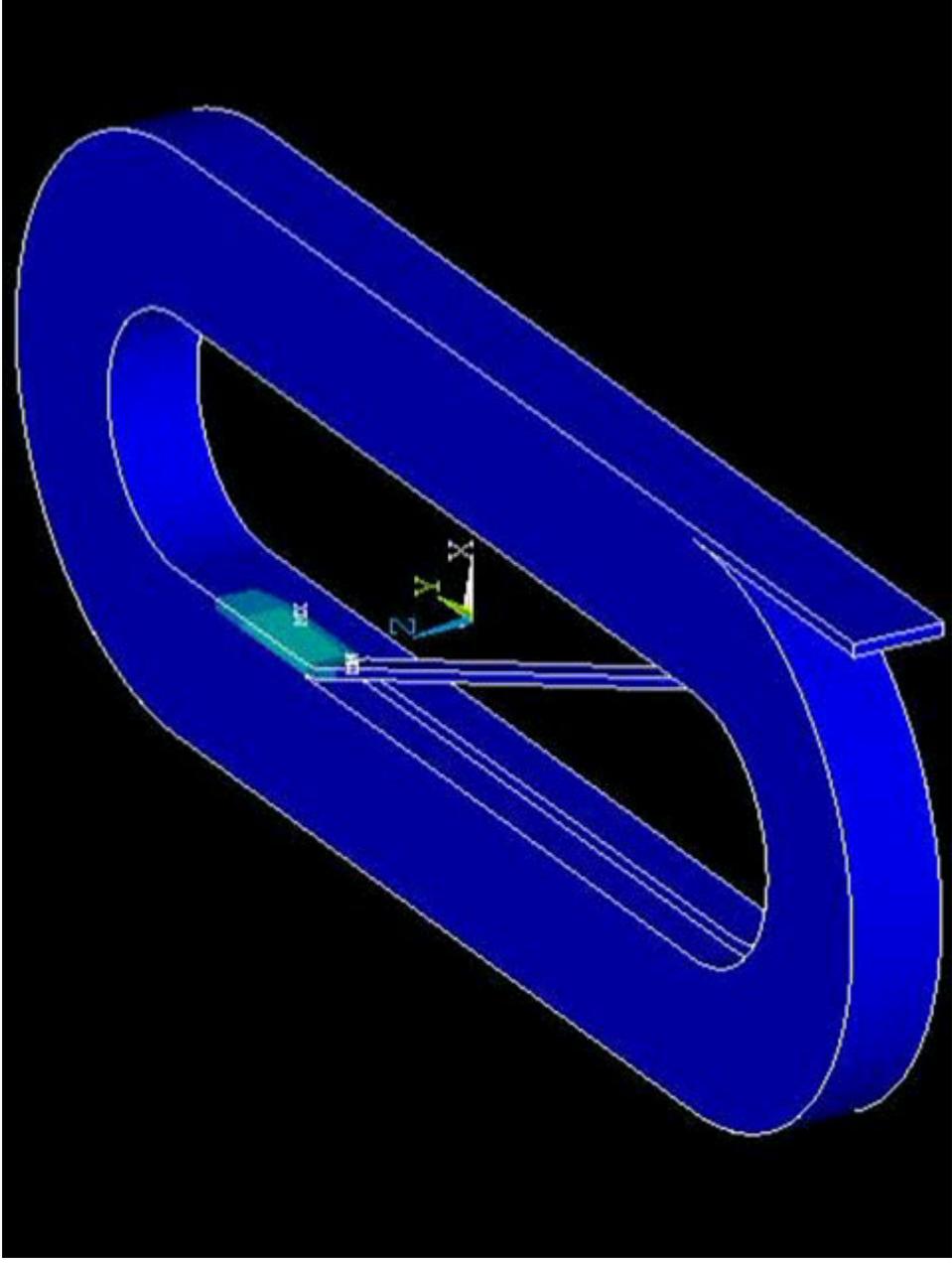
Leaks!

No leak!

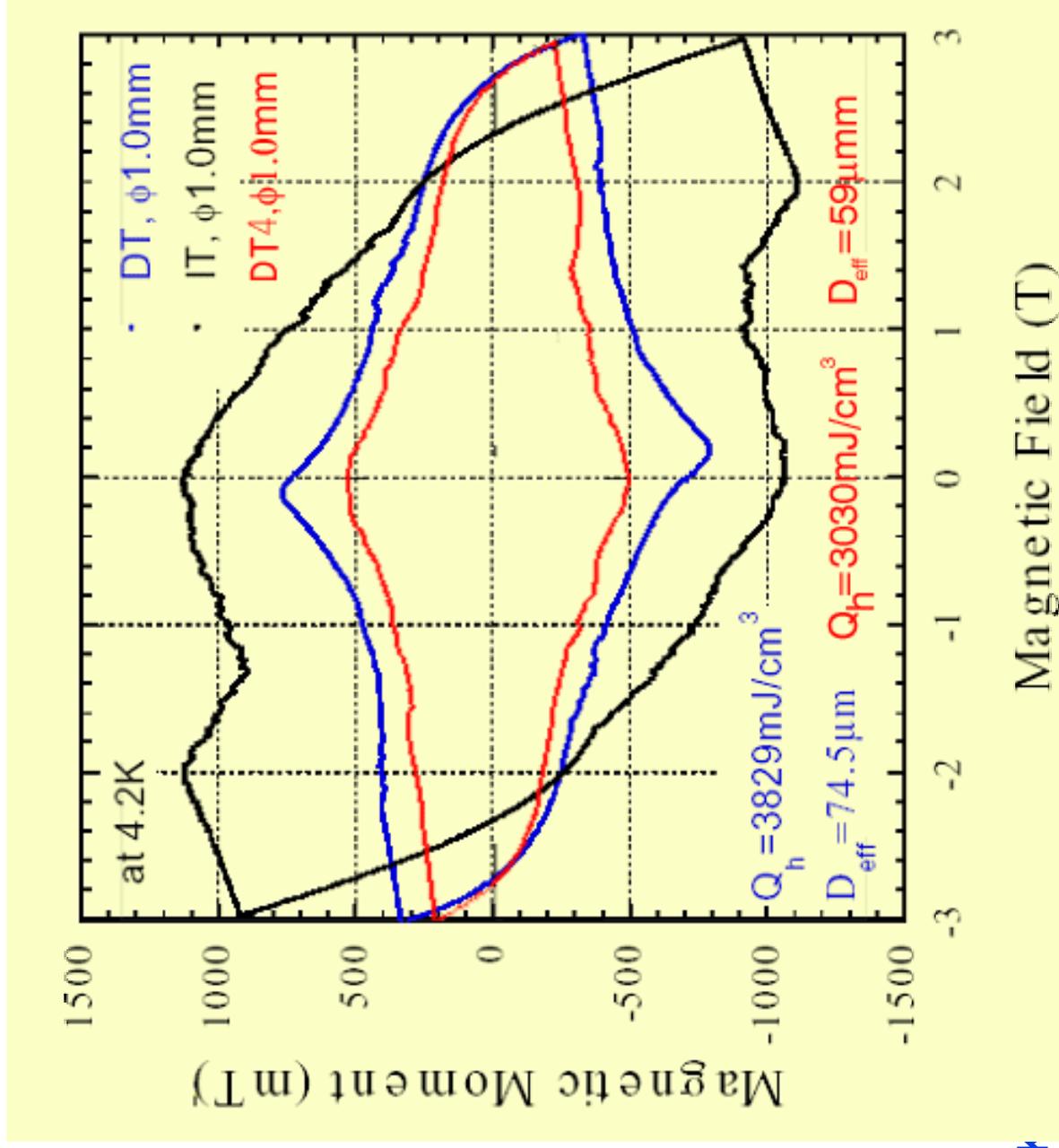
Quench Propagation of DT conductor



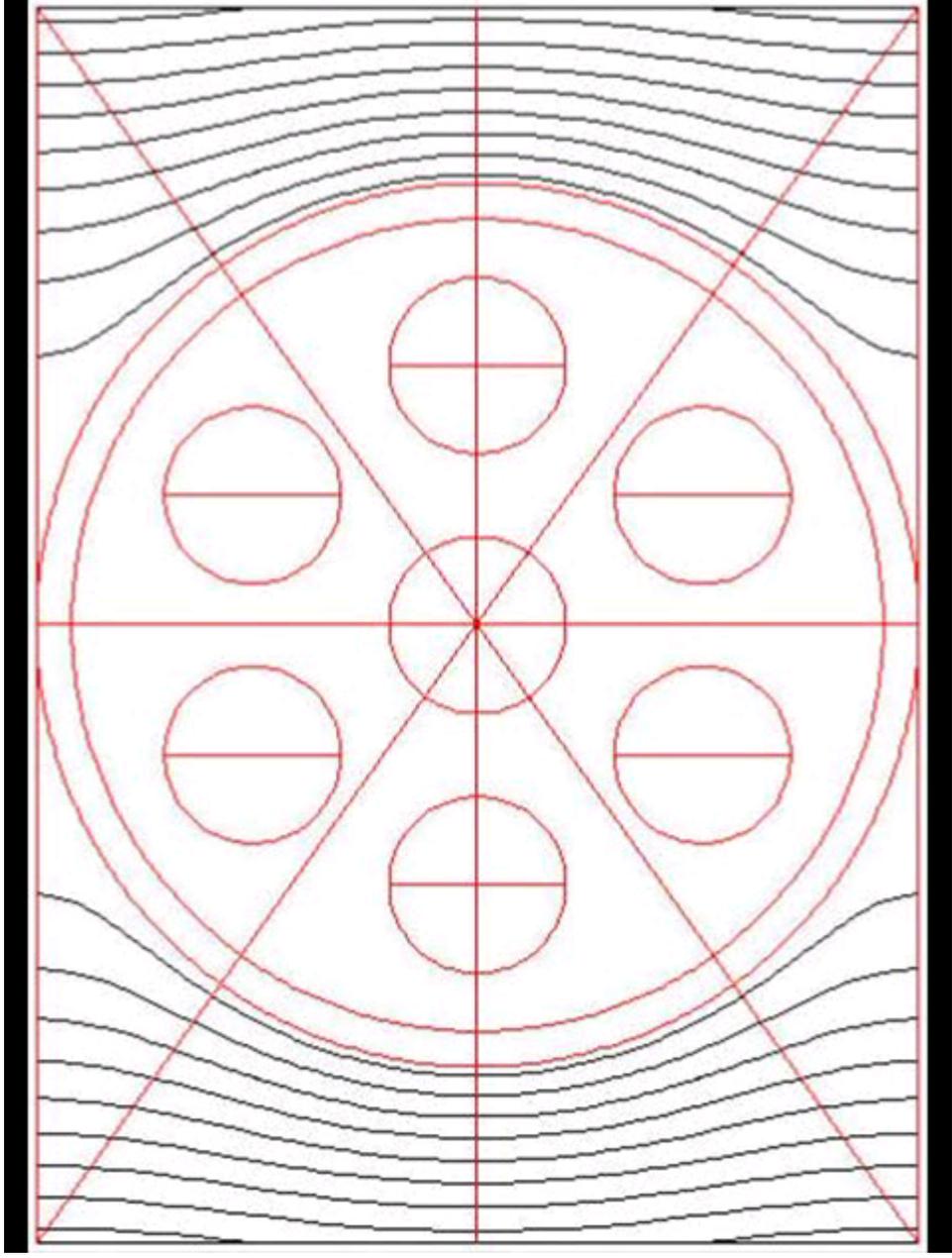
Magnet Quench of DT Cable



Magnetization Curve



Magnetization with Nb barrier



今年度の計画

- 14Tまでの素線試験が出来るように整備
- 静水圧押し出しによるDT法線材を作る
- 200A/mm²@12Tを実用化する
目途を立てる