

# 大型超伝導磁石中での低温検出器冷却

高田 卓

自然科学研究機構核融合科学研究所（NIFS）

B01『強磁場とマイクロ波・超伝導技術が切り拓く、暗黒物質アクシオン探索のフロンティア』分担者

# 自己紹介：極低温“工学”が専門

筑波大⇒核融合研

冷媒・無冷媒や規模も問わず温度域もあまり問わずに色々と

核融合研での仕事：

**大型超伝導マグネット**冷却して試験（4～5 K LHe, SHe）設備管理も10年ほど。

（例. 5 ton のマグネットを250 kWかけて2日間冷やして、8 T 下で 68kA流して接続部が3 nΩ以下を検証）

CMB業界(POLAR BEAR2, LiteBIRD)の手伝い：検出器ボックスの冷却システムなど（**0.25 K～ 無冷媒**）

KAGRAの手伝い：極低温サファイア鏡の懸架系や黒色コーティング開発など（**20 K～ 無冷媒**）

液体水素：安全研究として真空劣化とか（**20 K～ LH2**）

流体力学とか伝熱工学の工学部の研究室出身

超流動ヘリウムのその他の冷媒の熱流動：かなり基礎的な研究（**2.17 ～1.7 Kくらい He II**）

日本物理学会誌で解説記事 Vol.79-7「[超流動ヘリウム4における沸騰現象の可視化](#)」

「低温工学」というマージナルでニッチな分野を意図せず体現してしまったキャリア

「冷やしたい人はだいたい友達」 という精神で、

必要とされる時には出かけていきますので、

声かけてもらえれば手伝います。

核融合科学研究所には超伝導マグネット等々あるので、

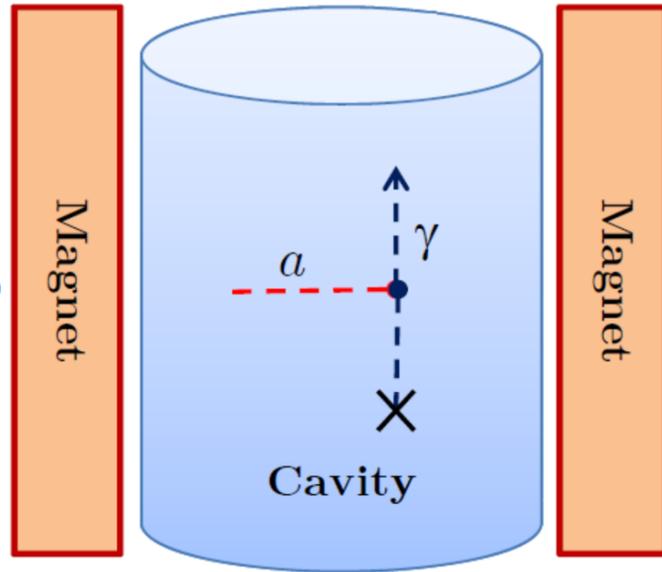
使いに来てください

(大学共同利用機関法人なので、お気軽に)

# 本題の目次

1. アクション探索の為に必要な項目としての大型磁石、極低温
2. 大型超伝導磁石の色々
3. 冷却技術の色々
4. 現時点の我々の選択

# 1. アクシオン探索の為に必要な項目としての大型磁石、極低温

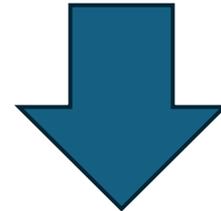


7: A sketch of a microwave cavity in which an axion-photon conversion occurs. Taken from [1].

狙うはQCDアクシオン探索

$$P = \frac{\beta}{1+\beta} G g_{a\gamma\gamma}^2 \frac{\rho V}{m_a} B^2 C_{\ell mp} Q_L$$

- 信号は磁場強度の2乗に比例
- 信号は体積に比例



今現在は、φ110 9T の小さな実験室サイズ(phase1)

もっと大きくて強いマグネットの中で、  
もっとフォトンノイズの少ない超低温での計測がしたい

## 2. 大型超伝導磁石の色々

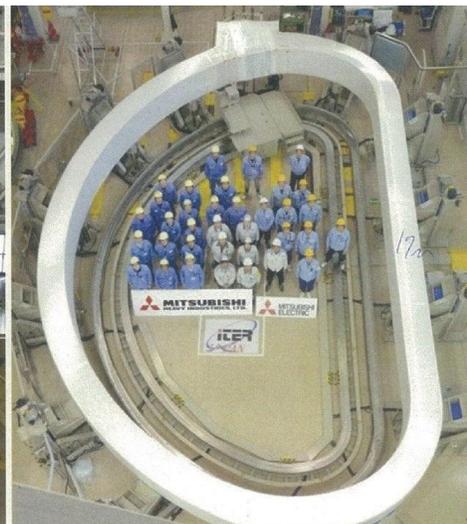


0.4 T シリコン単結晶の引き上げマグネット



1.5 ~ 3 T MRI

商業的に成功した超伝導磁石は全てNbTi線でメートル級



もはや磁石と呼ぶには大きすぎる核融合用

←縦17m くらいのITER TFマグネット

11.8 T Nb<sub>3</sub>Sn 導体≠線 (68kAも流すので)

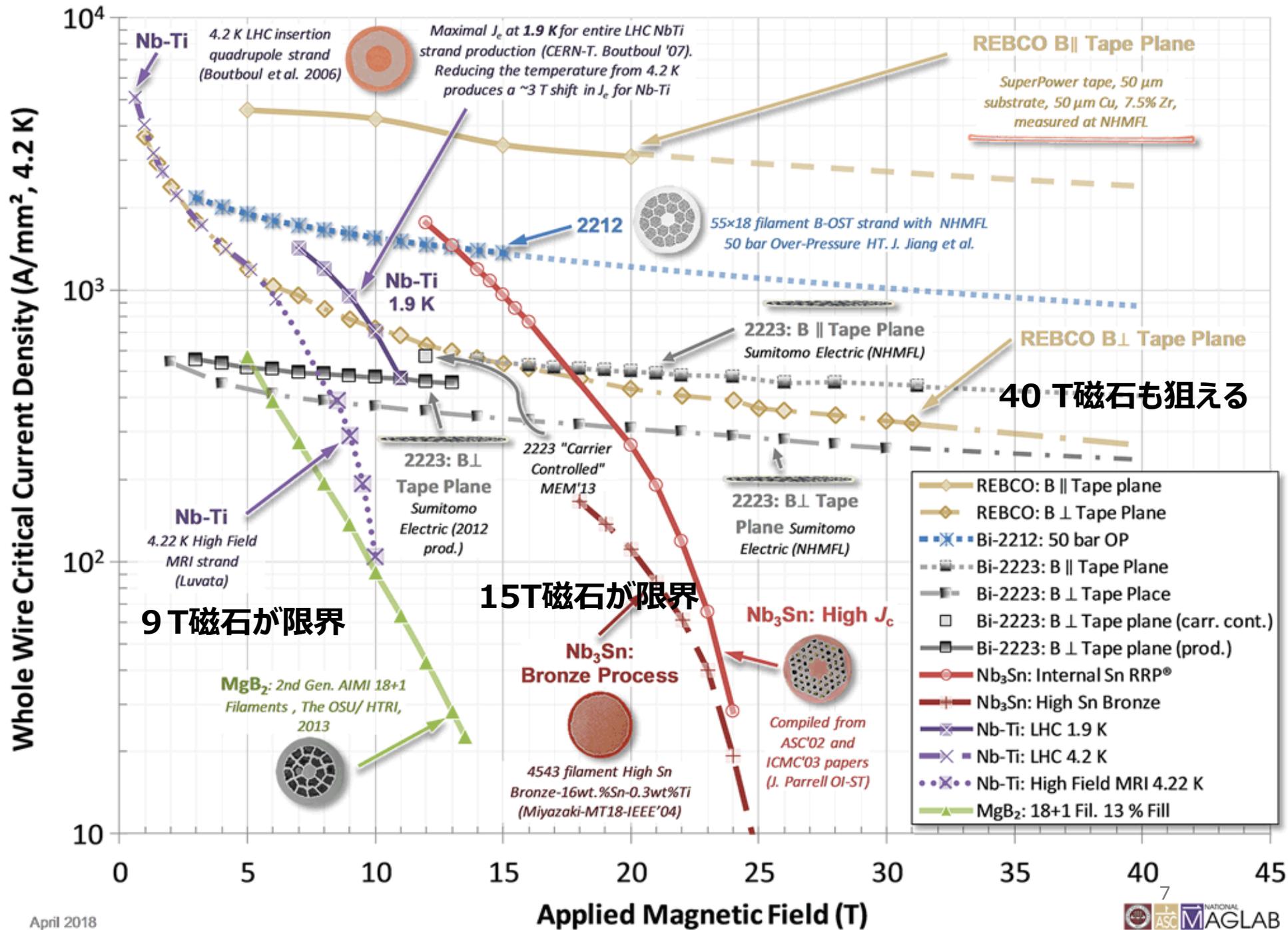
# 超伝導線の限界

臨界電流値vs 温度

使いやすさは  
NbTiが圧倒的

Nb3Sn は焼成が必要  
焼成後も曲げにくい

REBCOはテープ形状  
異方性・歩留まり  
長尺化・超伝導接続  
クエンチ保護  
に難しさ。



# 超伝導線の性質を背景に例えばMRIだと。

- 1.5 ~ 3 T MRIは一般に普及
- 7 T は国内で数台
- 9 T MRI 世界に数台
- 11.7 T MRI 世界に1個



比較的低磁場なら遊べる



9 Tだともう小さい

←もう市販品じゃないしバカでかい！！

コイル内部の最大経験磁場とボア中央部の磁場が違うので、サイズのある7 T MRIは NbTiだけでは成立しない。



# 磁場が高くて、大口径というアクション探索は ワガママなお客様



45 T ハイブリッドマグネットは  
ボア径32mm（フロリダ国立強磁場研究所）



世界最強クラスのNMR 28.2 T ボア径は54 mm

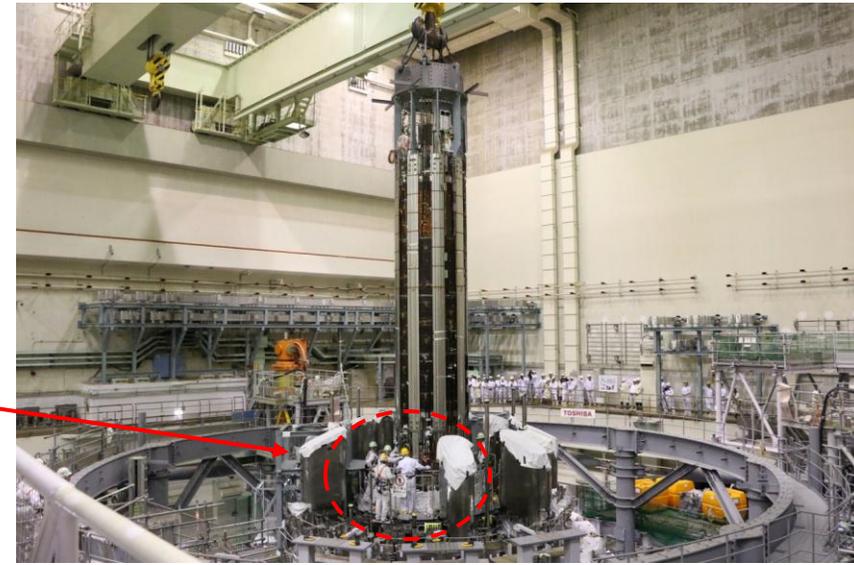
だいたいの超高磁場技術は常温で2 inch径の穴があいているのが主流

# 核融合もワガママ

大きいと電磁力で  
マグネットが自壊するので構造材が大変。

アクション探索は未知の粒子ゆえ、  
磁場・体積の要求値が明確には決まりにくく  
探索性能と実現性のバランスが難しい。

人の大きさ



JT-60SAのセンターソレノイド挿入シーン (@QST)

導体試験の為に  
 $\phi 600$ で13T (4 ton)  
(@核融合研)



## 2. 冷却技術の色々

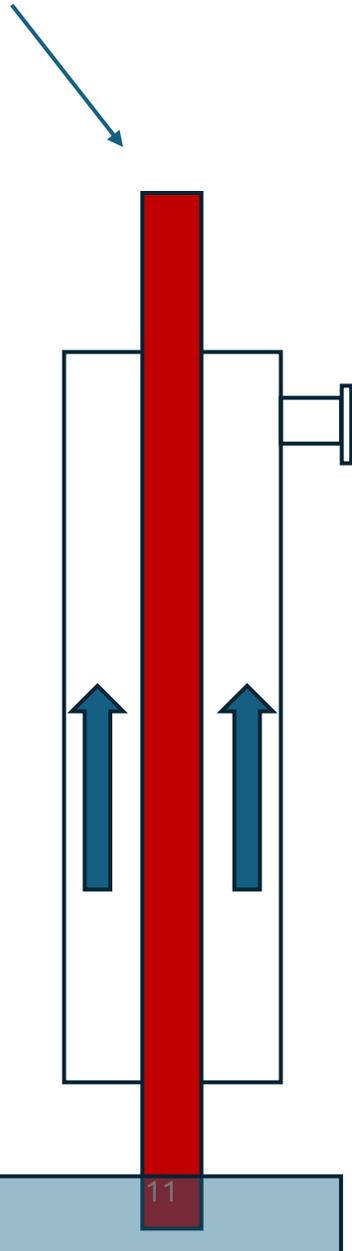
液体ヘリウムの蒸発ガスで銅リードを冷却して通電。

**マグネットの大きさ(電流値)次第で冷却技術が色々**だが、  
アクション探索の周波数スキャンが長期連続運用が限定してくる。

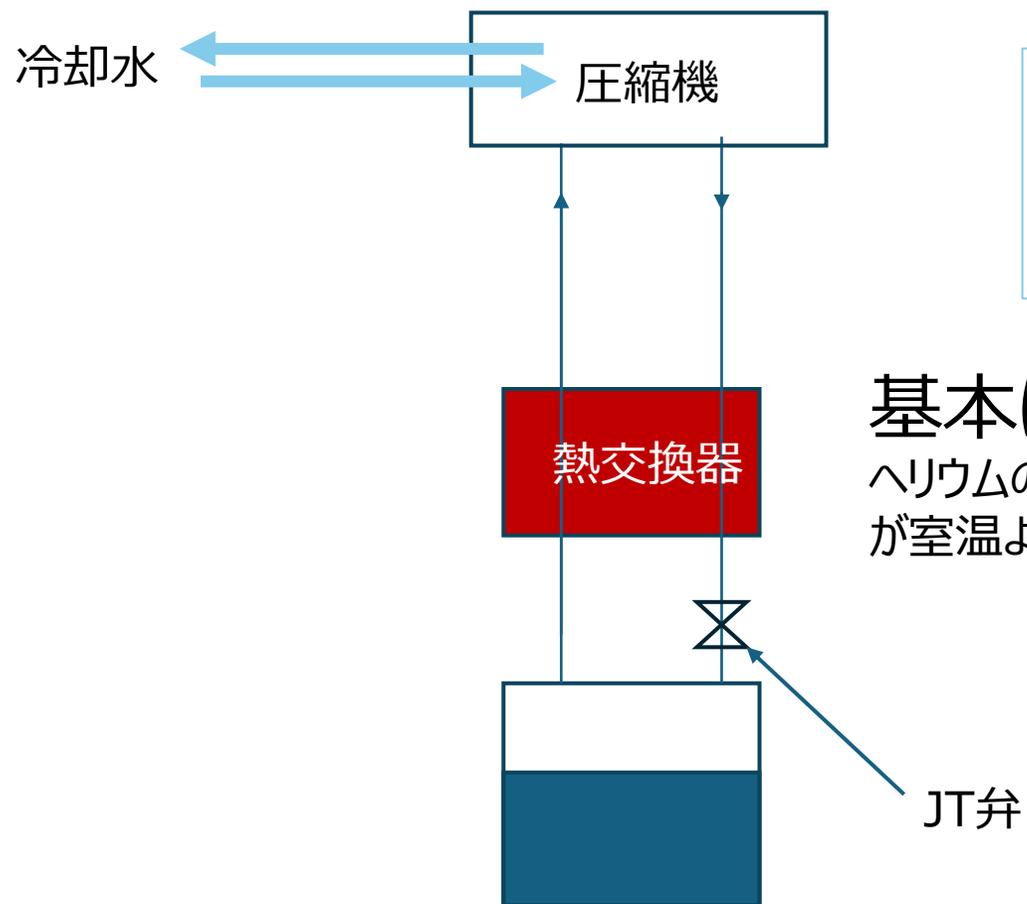
通電電流が大雑把に **数 kA超で液化機の出番**  
**それ以下の電流or永久電流モードで 小型冷凍機(1Wオーダー)**

REBCOは永久電流モード技術が未達  
他は出来るが、電流値が大きいと難しさも

**液化機だと高圧ガスの法規対応等が絡んで人数の配置が必要。**



# 液化機の原理は単純



圧縮した時に温度が上がる分を冷却水で常温に  
そこから戻りのガスと熱交換しながら  
徐々に膨張させるだけ

## 基本はこれだけ

ヘリウムの逆転温度（J-T膨張で温度が下がるようになる境目）  
が室温より大分低いということ以外特別なことはない。

リンデ-ハンプトン 液化機

# 小型冷凍機の代表格GM冷凍機

- GM冷凍機は蓄冷材端っこの膨張仕事を

蓄冷材で温度勾配付けているようなもの

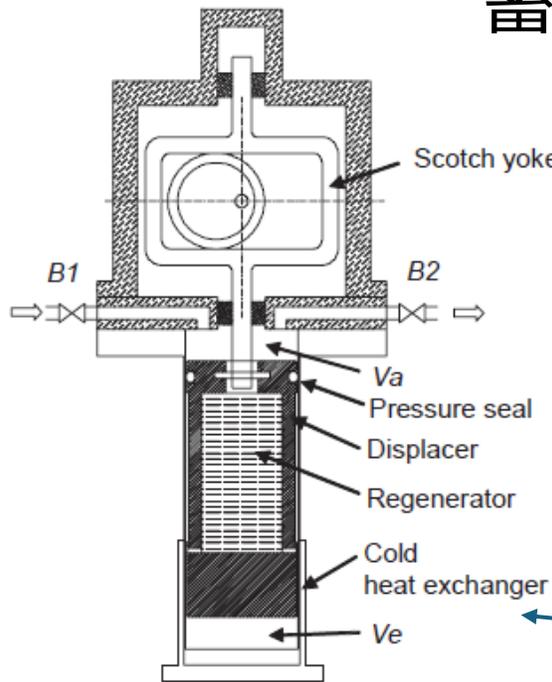
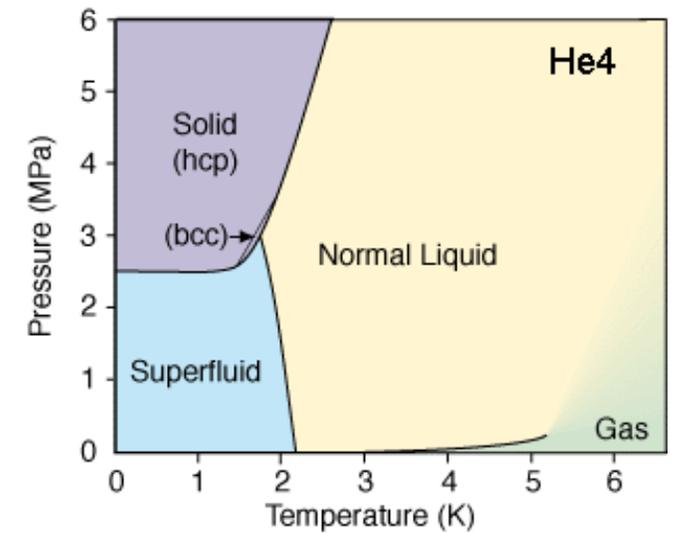


Fig. 1 Schematics of a GM-cooler.



この辺が高磁場に曝されると動かない

GM冷凍機

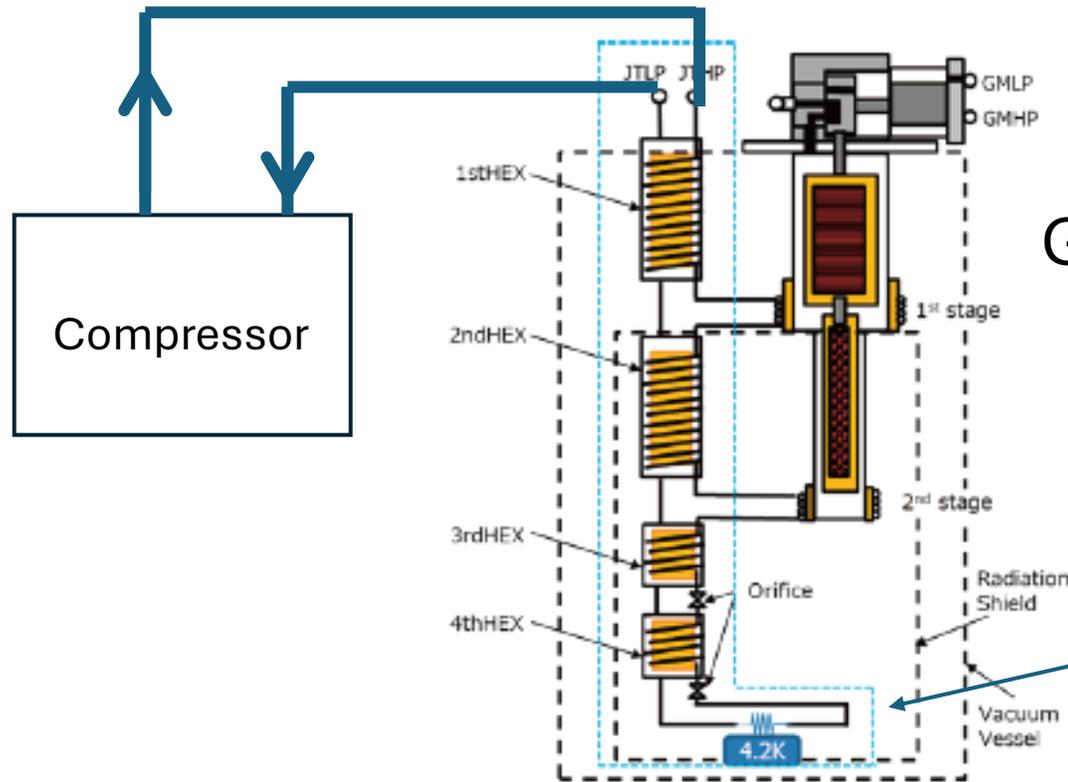
パルス管冷凍機では

冷却限界は入点 2.17Kより僅かに下くらいまで  
(He II-He Iの相転移線が傾斜)

蓄冷材が動くので振動がやや大きい  
気になる人はパルス管冷凍機へ

# GM + JT ← B01はこれを選択

冷凍機とは別にHe循環ループ⇒ コンプレッサーを余計に1個追加。



GM冷凍機で予冷されたHeガスを  
オリフィスを通して断熱膨張させて液化

最低到達温度の場所は  
細管さえ伸ばせば良いので選べる。

Fig. 2 RJT-100ST cryocooler.

**$^4\text{He}$  を使うとおおよそ頑張っても1 Kまでしか冷却できない**

# 1K 以下の冷やし方

4He を減圧すれば1 Kまで ← 我々は1.7 Kを目指す

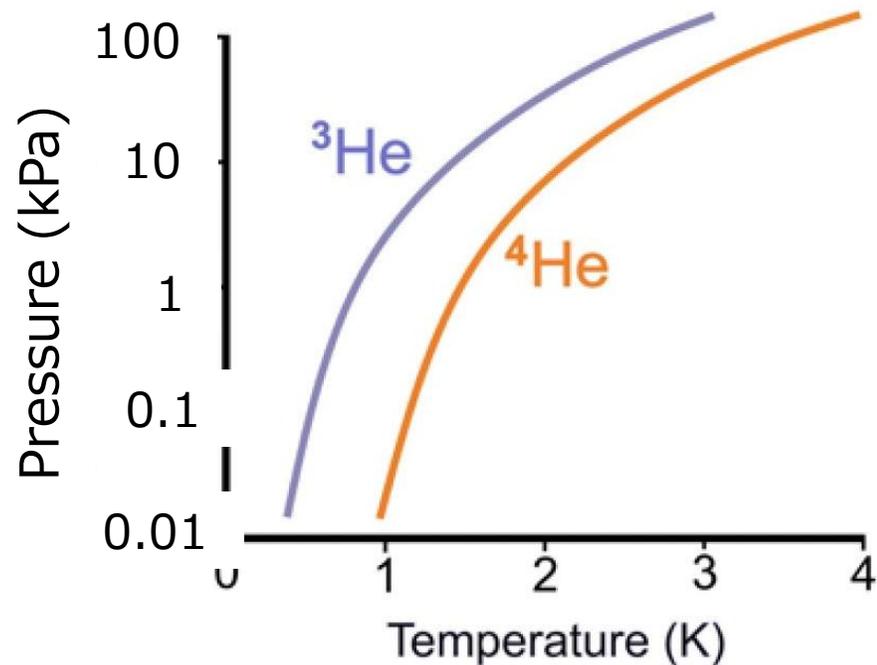
3He を減圧にすれば0.3Kまで

このガスを使うとなった時点で超高級品になってしまう。

3He-4He を使った**希釈冷凍機**で10 mK辺りまで。

50 mKくらいまでは断熱消磁場冷凍機も1つの選択肢（高磁場下ではダメ）

\*1 m Kオーダーでまた核スピンを使う磁気冷凍機が有力

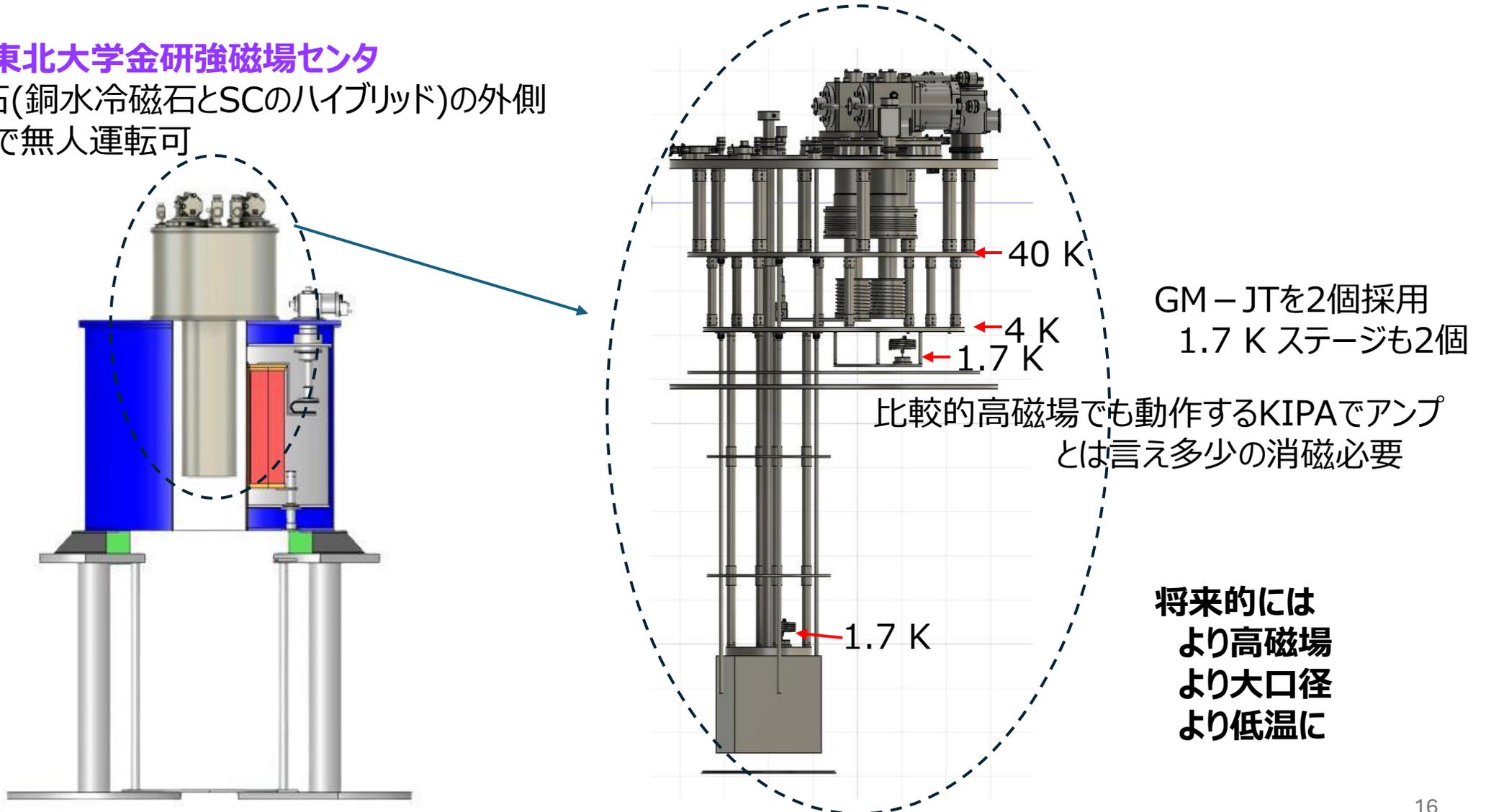


3Heにするとポンプが楽だが、  
ガスの値段がとんでもなく高い。  
5桁位の差か？

# 4. 現時点での我々の選択

## 9T360-CSM 東北大学金研強磁場センタ

かつての28T磁石(銅水冷磁石とSCのハイブリッド)の外側  
GM冷凍機冷却で無人運転可



# まとめ

アクション探索には

大型高磁場マグネット + 低温キャビティ・読み出しが有力

幾つもの既存技術があるが、規模感との性能のバランスが重要

次のステップでは下記の武器で挑む

- **9 T 室温ボアφ360mmの超伝導ソレノイド磁石（東北大強磁場センタ）**
- **1.7 K GM-JT 冷凍機を2台搭載したクライオスタット（新規製作）**
- **アンプにKIPA（沓間さん開発中）**
- **キャビティ（岸本さん開発中）**

2027 年度の実験スタートに向けて推進中。

呼称について

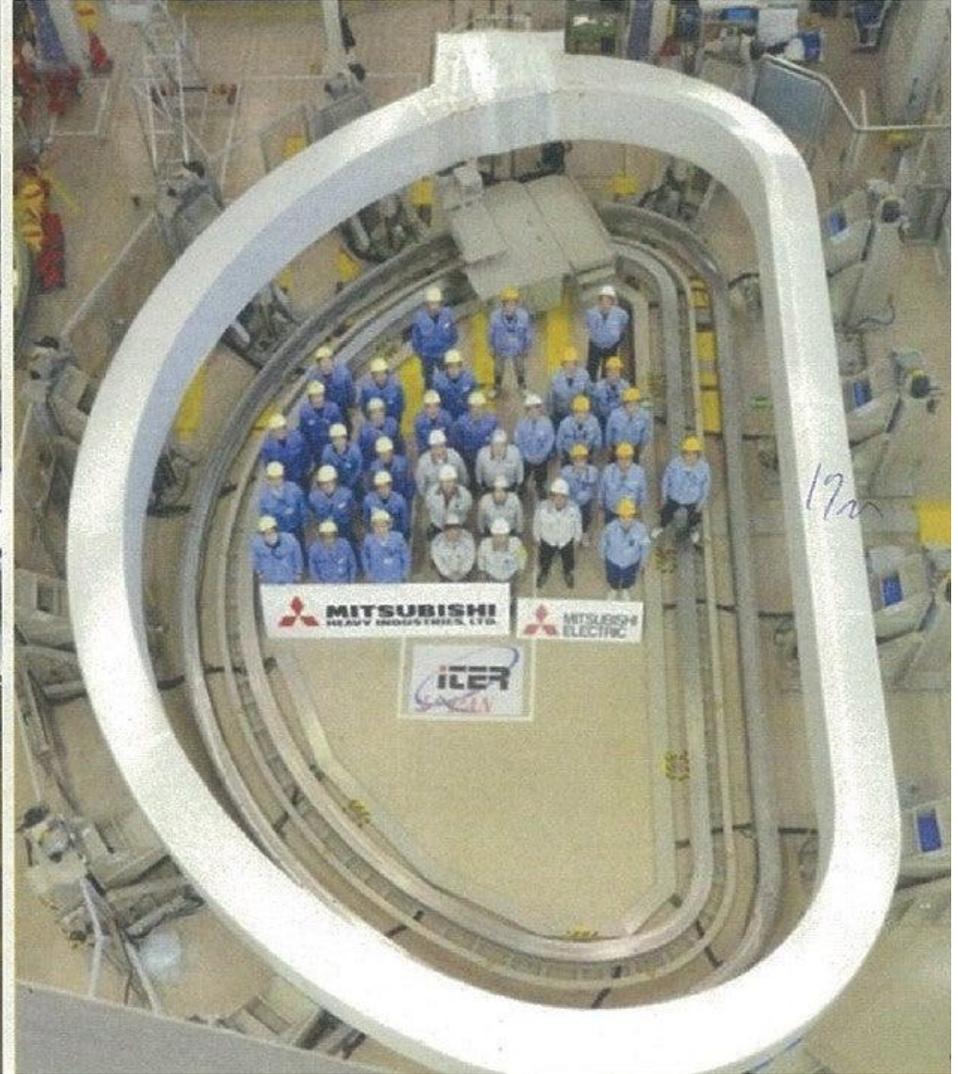
**EDAMAME**

EDAMAME (Explore DArk matter Mystery through Anomalous Microwave Emission) 実験

Phase 1:φ110 9T

Phase 2:φ320 9T

Phase 3:計画中



# 小型も幾らか。

- 0.5, 1, 6, 20, 75kAの直流電源（電圧はでない）
- 超流動クライオ（小型3個、大型1個）
- 9 Tスプリットの(50x 30mm)
- 14.5Tの小さいもの(50 mm bore)
- 9 Tソレノイド(150mm bore)

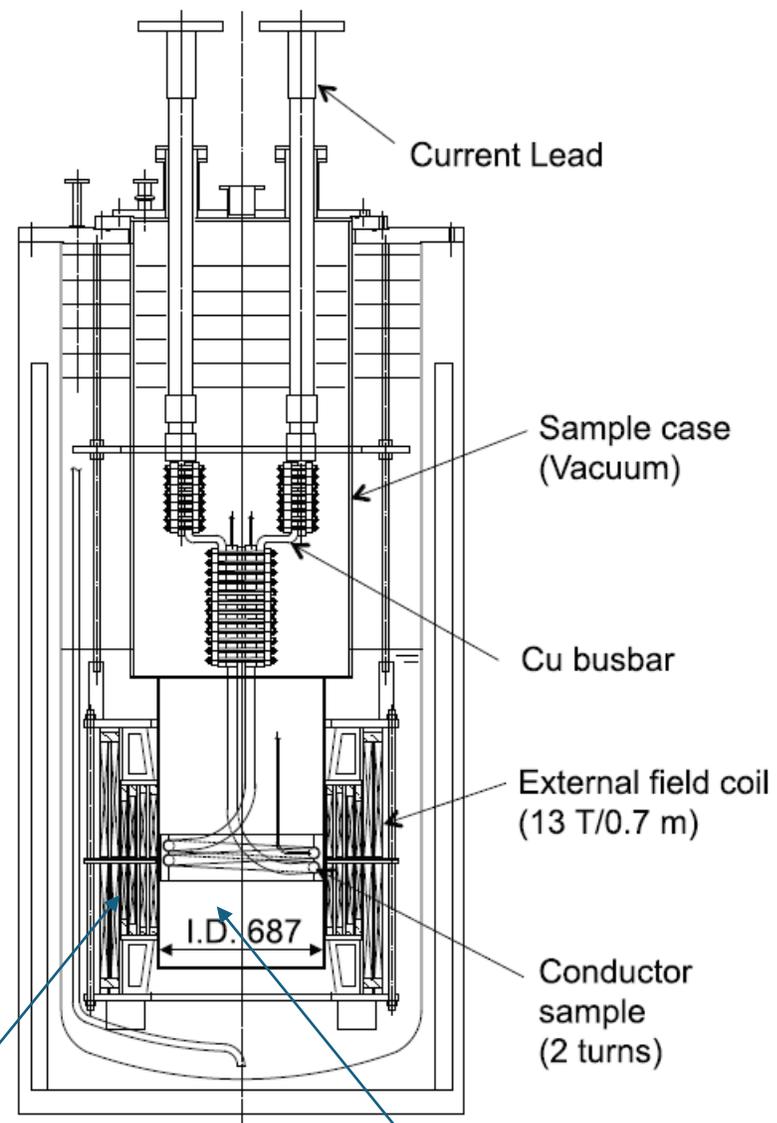
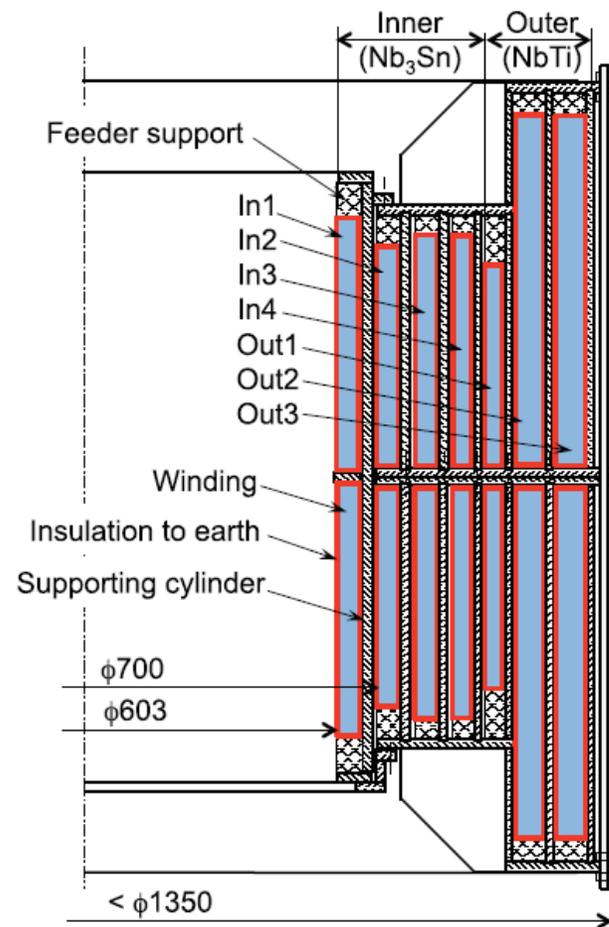
全て大電流対応の為、LHe冷却



Φ50くらいの14.5T

# 13Tソレノイドの概要

50kA 電流リード (試験部)



ここが試験部

液体ヘリウム冷却

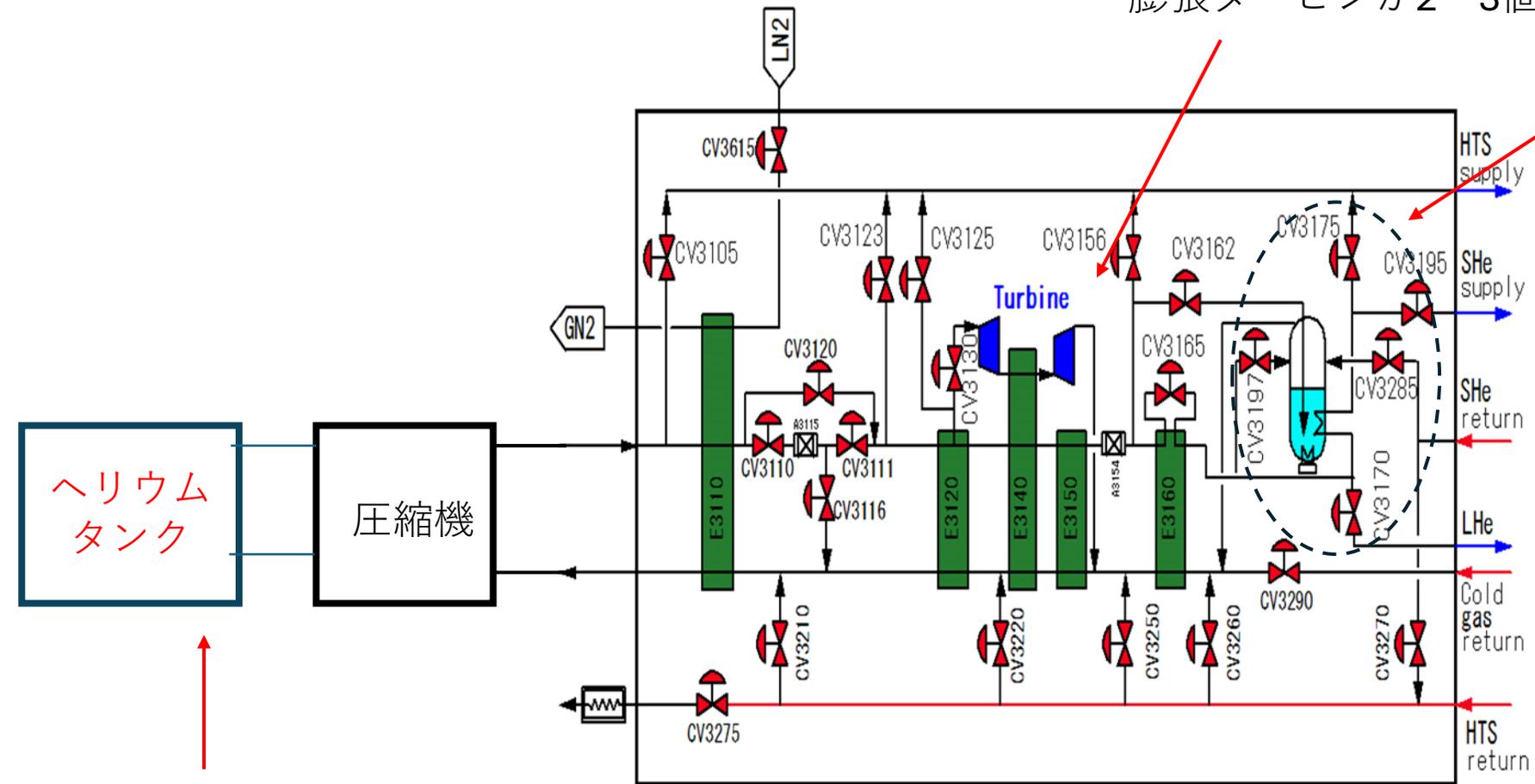
サンプル空間は真空



# 例えばNIFSではこんなものを使っています

膨張タービンが2~3個

この辺りの弁はどれも隙間が小さいJT弁



冷えたり液化するとガスの容積が減るので補うようにヘリウムタンクが必ず必要。小型システムでも一緒。

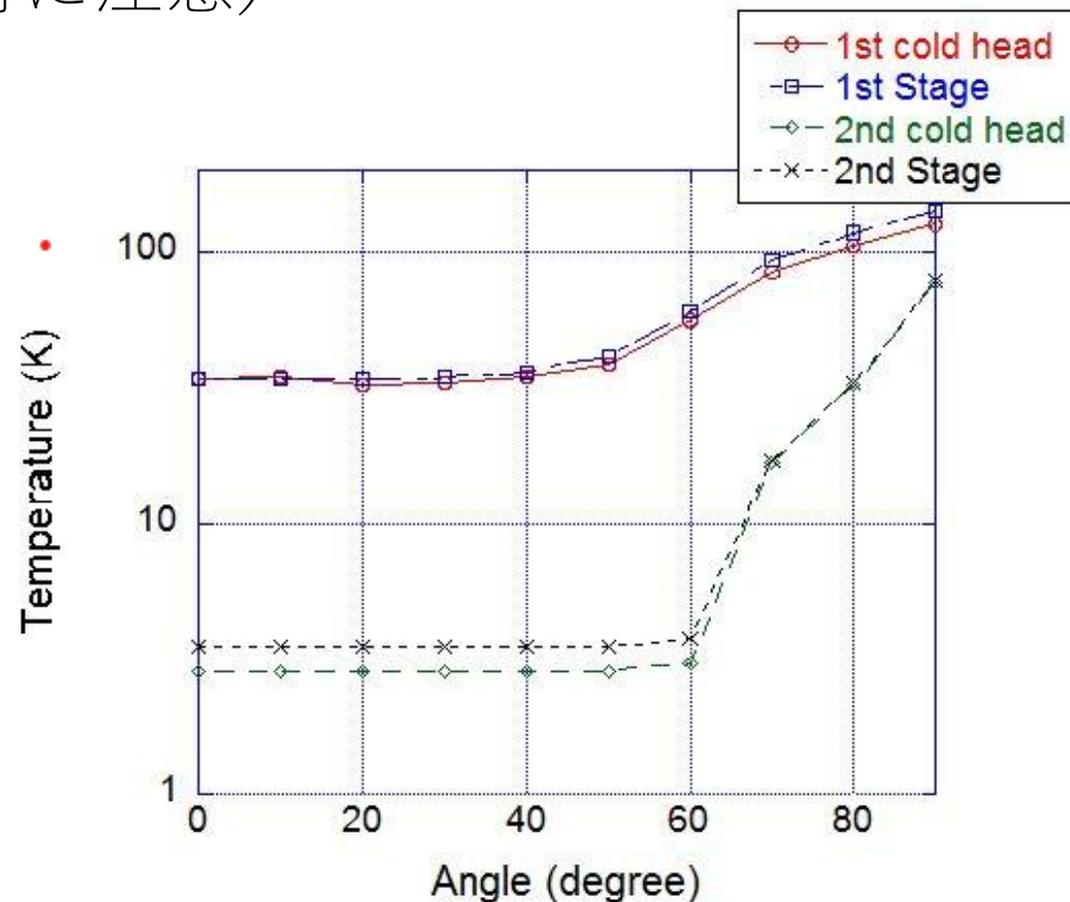
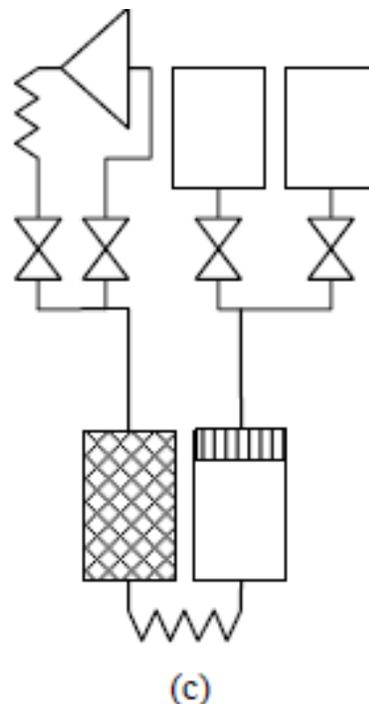
パルス管冷凍機は  
 振動が少ない（蓄冷材が動かない為）  
 バルブ分離型ならかなりの低振動  
 （ワイヤの振動による発熱など気にする時に注意）

注意は角度依存性

**PT>GM**

正しくは

**GM型パルス管冷凍機が**  
 いわゆるパルス管冷凍機



最低到達温度の角度依存性

# その他にある超伝導マグネット研究棟にある装置群の紹介

大型真空容器 (80KシールドのI.D.2.5m)



9Tスプリットペア  
550x100mmの空間



18tonのコイルを冷やした  
このコイルはもう無いが。

## 2. NIFS超伝導導体試験装置

冷却系の改造を行ったNIFS超伝導導体試験装置では、強制冷却型及び浸漬冷却型超伝導導体を、最大9 T環境下において、75 kAまで通電することが可能である。

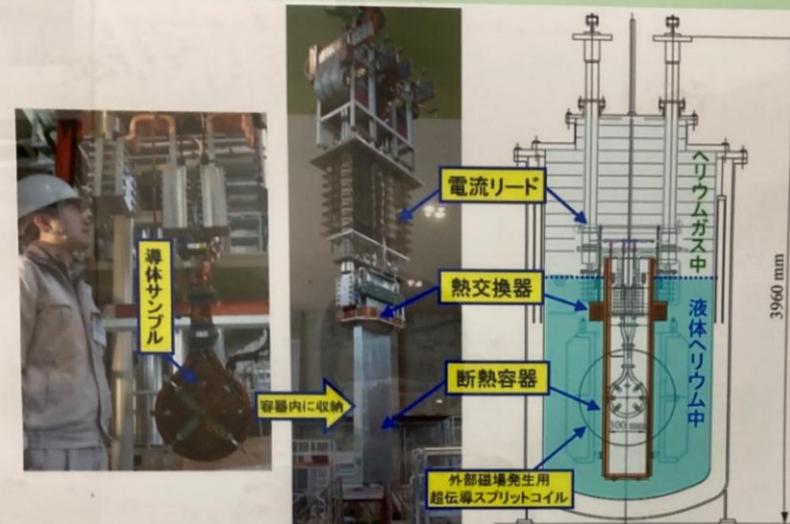
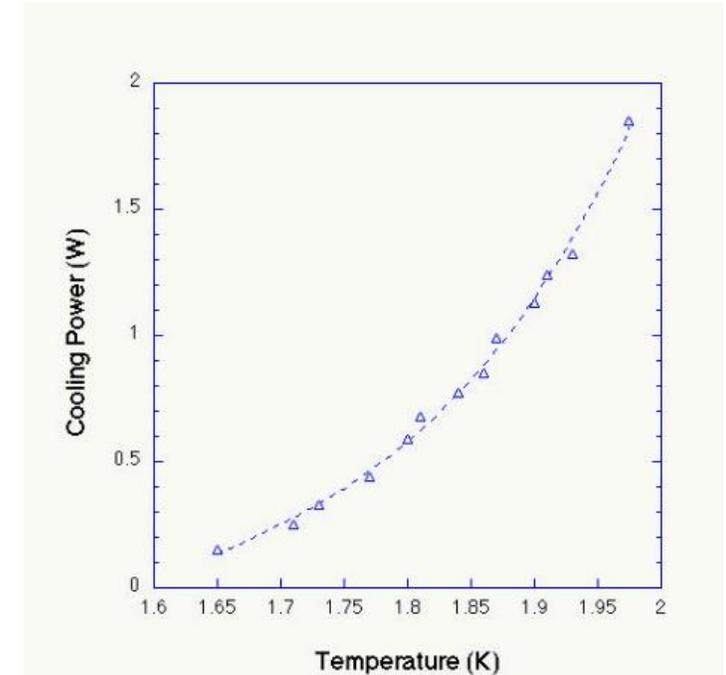
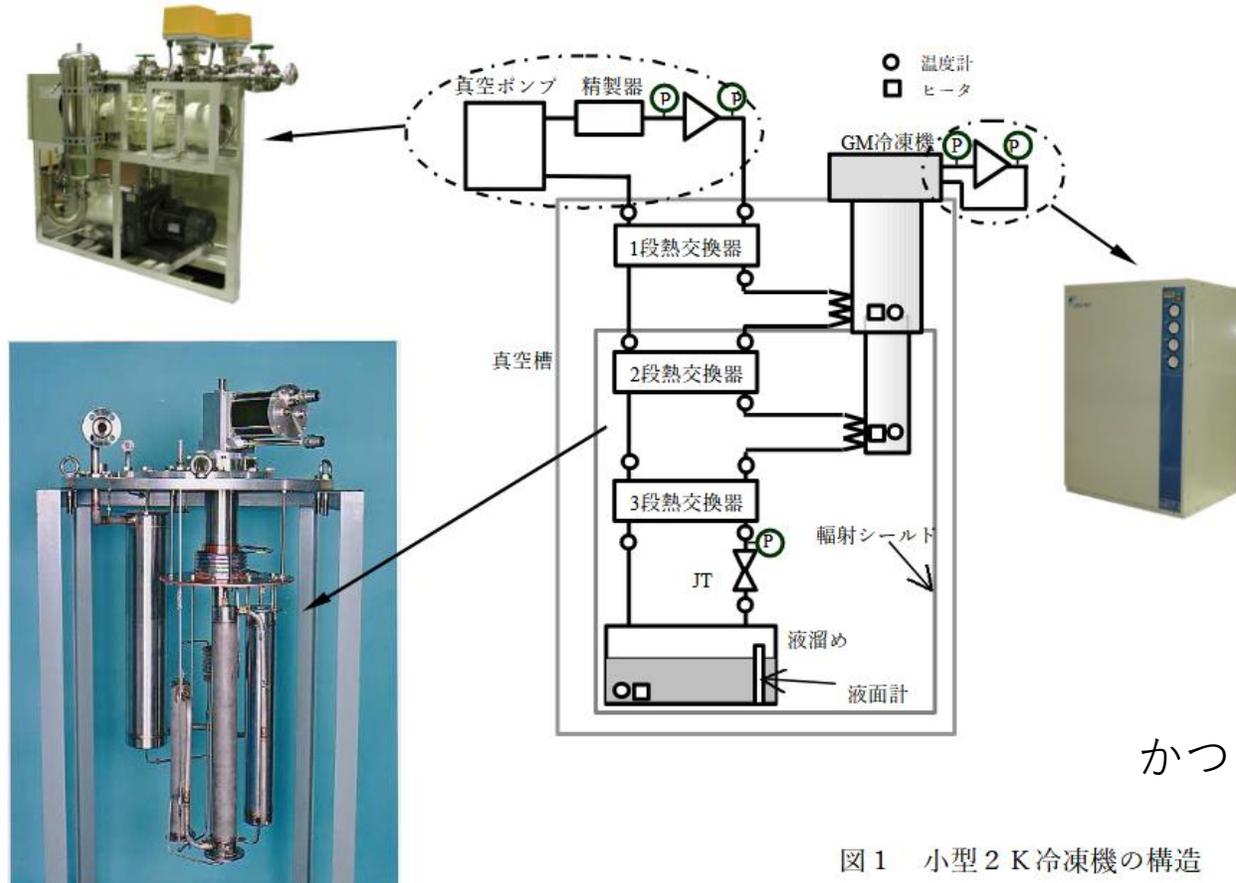


図1. 超伝導導体試験装置

表1. NIFS超伝導導体試験装置の諸元

<b>DC Power supply</b>	
Maximum current	75 kA (three 25 kA units)
Current ripple	60 A or less
<b>Current lead</b>	
Capacity of carrying current	100 kA
<b>Split coil</b>	
Maximum magnetic field	9 T
Test space	550 mm × 100 mm
<b>Cryogenic system</b>	
Capacity	600 W at 4.4 K / 250 L/h
Maximum Mass flow rate of SHE	50 g/s
<b>Measurement instruments</b>	
Accuracy of the temperature measurement	± 0.04 K
Error of the mass flow rate	Several percent
Low pass filter	10 Hz

# GM-JTの限界はHe II冷却の限界までOK



かつてNIMSと東芝で作った2 Kシステム  
1.2W@1.9 K

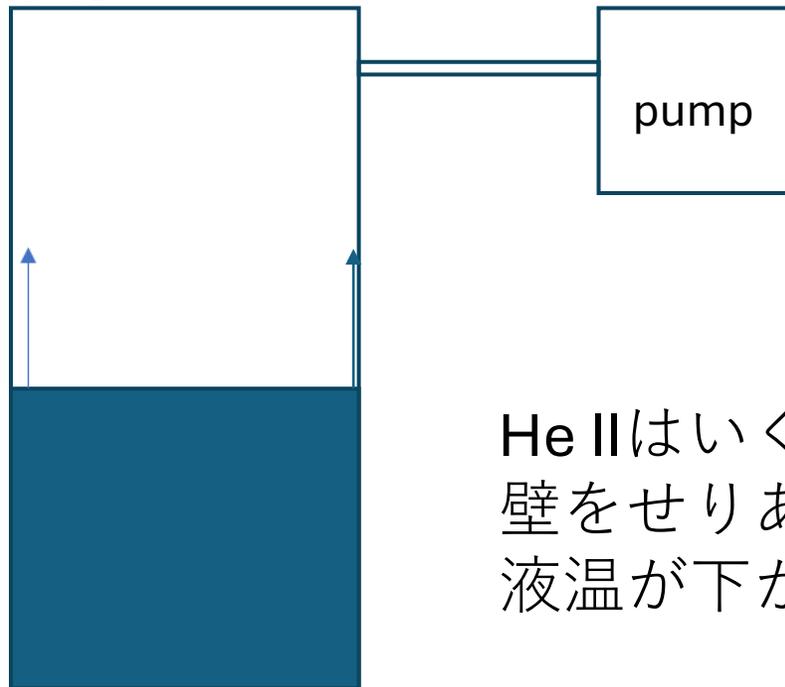
図1 小型2 K冷凍機の構造

もちろん冷却効率は低い。ポンプもしんどい。

# 3He の利用

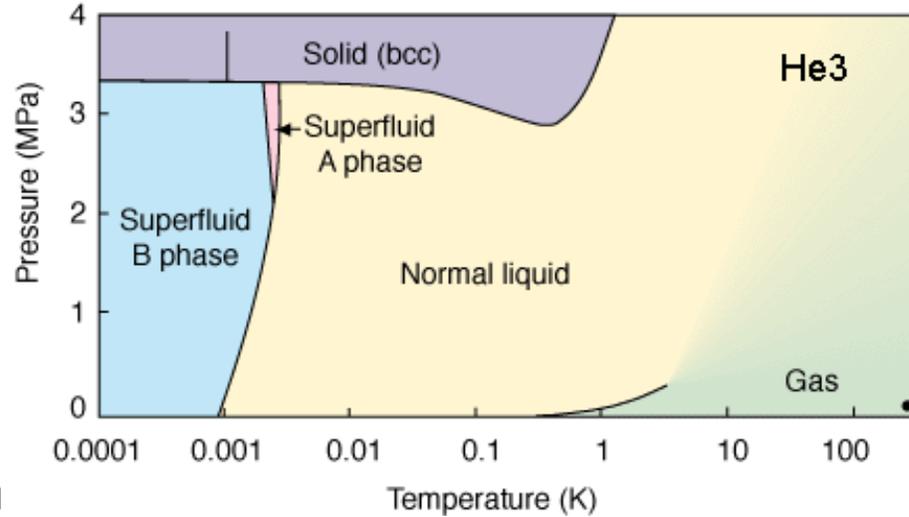
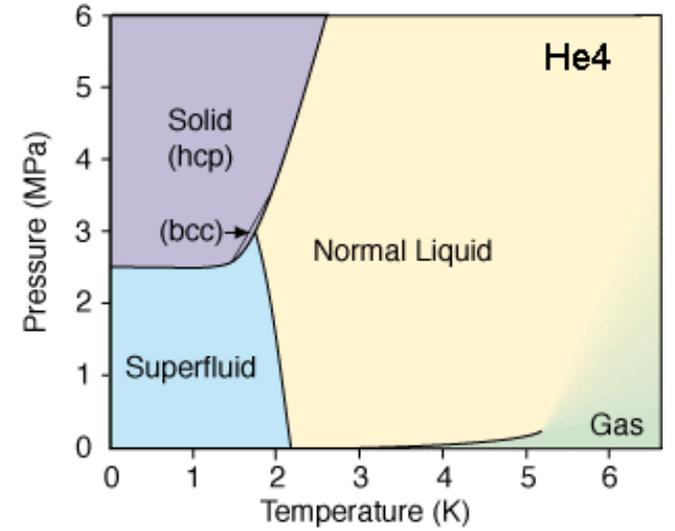
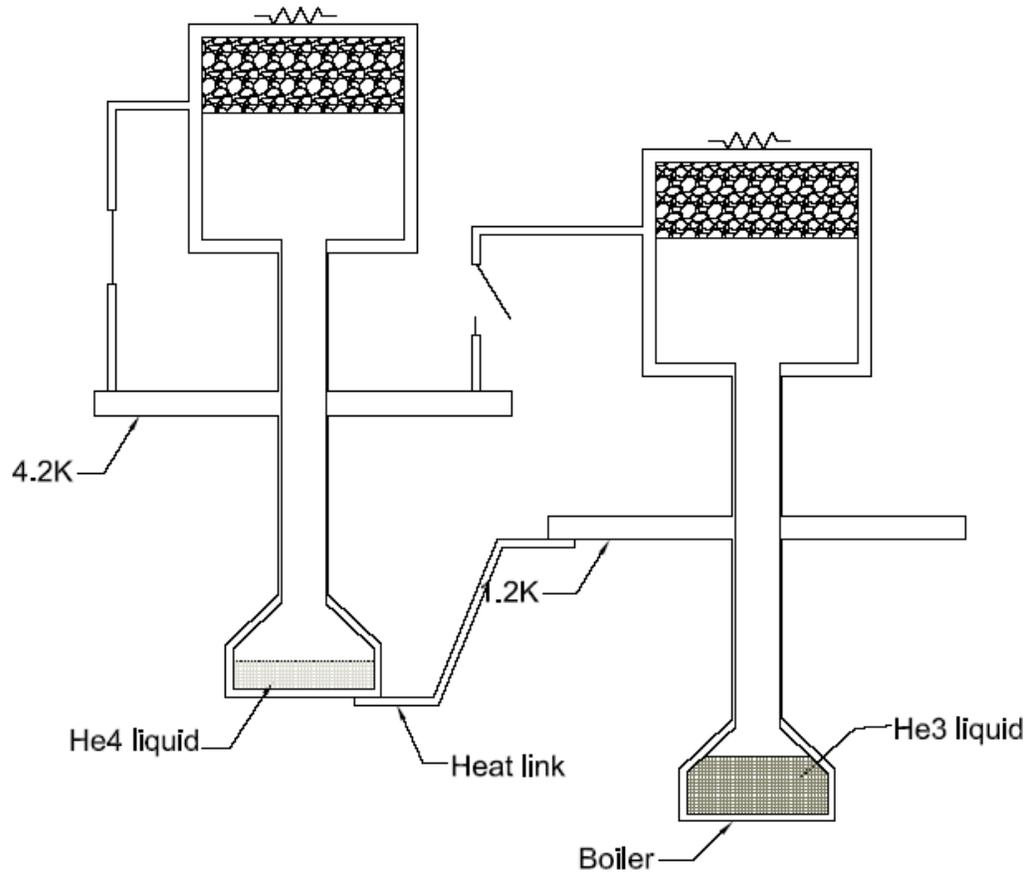
減圧して飽和蒸気圧力が低すぎると低温で出来るだけ圧力が欲しくなる。  
(例：宇宙用などだと3He JTで1.7K達成 (SHIの独壇場) )

- 一方、0.5K位がHe IIで冷却する限界
- 4He は超流動によるフィルムフローが冷却の邪魔をしてしまう。



He IIはいくら減圧しても  
壁をせりあがるfilmばかりが蒸発して  
液温が下がらなくなってしまう。

# POLARBEAR 1&2 はHe 3 で250mK



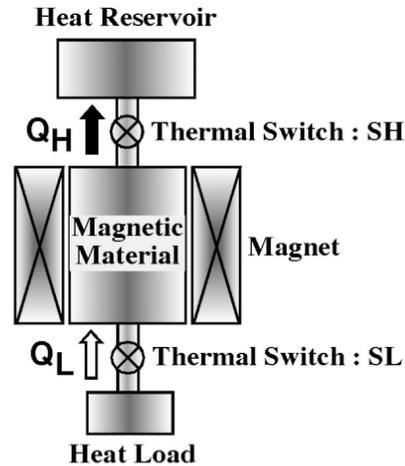
1 atm (1e5 Pa) boiling point: 3.2K  
 Critical point: 3.3 K



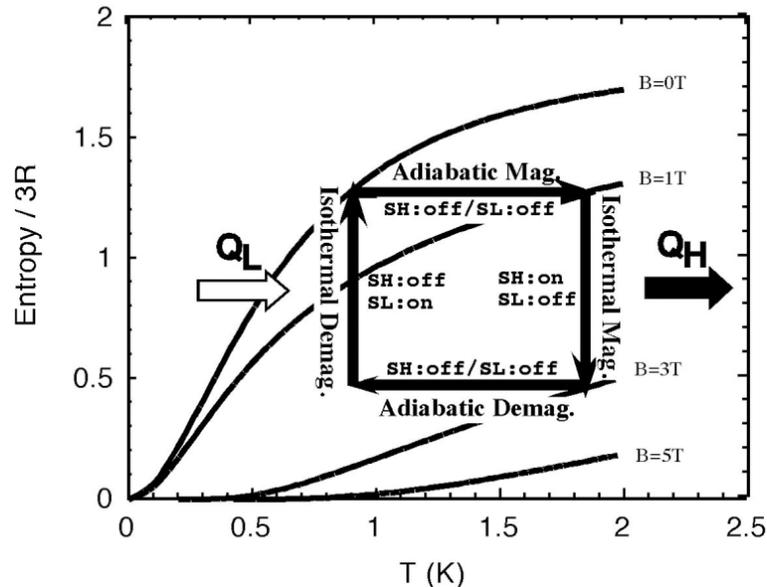
Simon Chase He-10

# ADRの基本原理 ⇒ 間欠的な冷却

常磁性塩の断熱消磁冷凍：電子スピンを磁場で操作してやる



気体冷凍	磁気冷凍	温度
圧縮	励磁	上昇
膨張	消磁	下降



理想的な効率に近いため  
重要な変数：ソルトピルの質量・磁場・

# POLARBEAR-2がかつてADRに対してた要求値

- Cooling down from 0.4 K to 0.1 K

Detector stage 0.1 K ( $\phi$  410 mm)

Holding time > 20 hours

Recovery time < 4 hours

求められる冷凍能力@0.1K  $\sim 6 \mu\text{W}$  (安全率2を含む)

	FAA	CPA	CCA	
lowest temperature	40mK	20mK	10mK	おおよその値
melting point	40°C	89°C	116°C	
heat exchanger	Au	Cu/Au	Au	
lowest temperature	1000g/l	200g/l	10g/l	25°C環境下でおおよその値

Entropy:

**FAA > CCA > CPA**

FAAがCPA約2倍、

CCAはCPAの約1.2倍 (先行研究が少ない)

# 希釈冷凍機 (3He-4He 冷凍機)

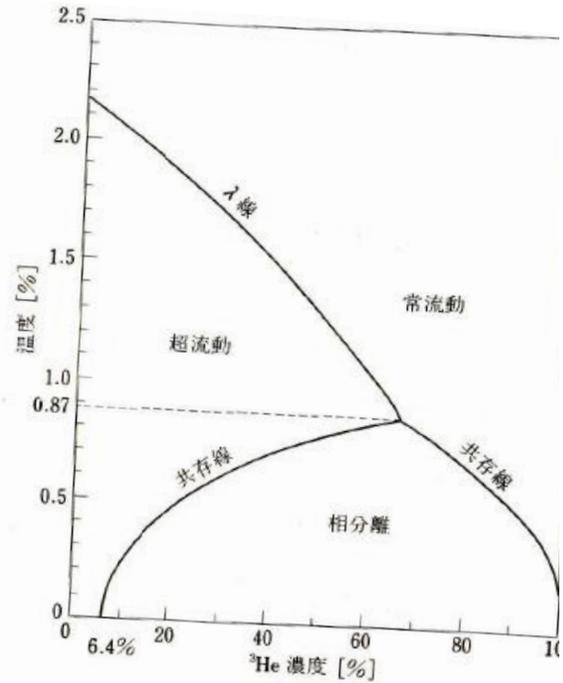
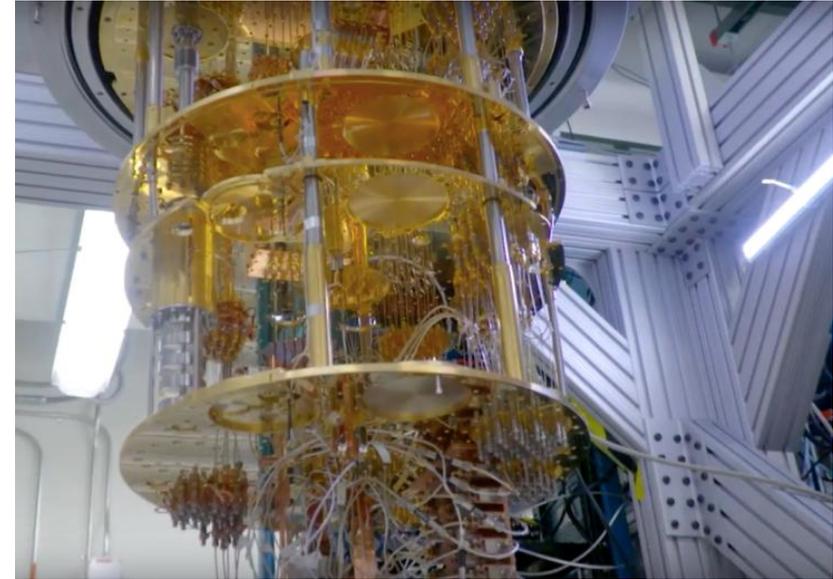
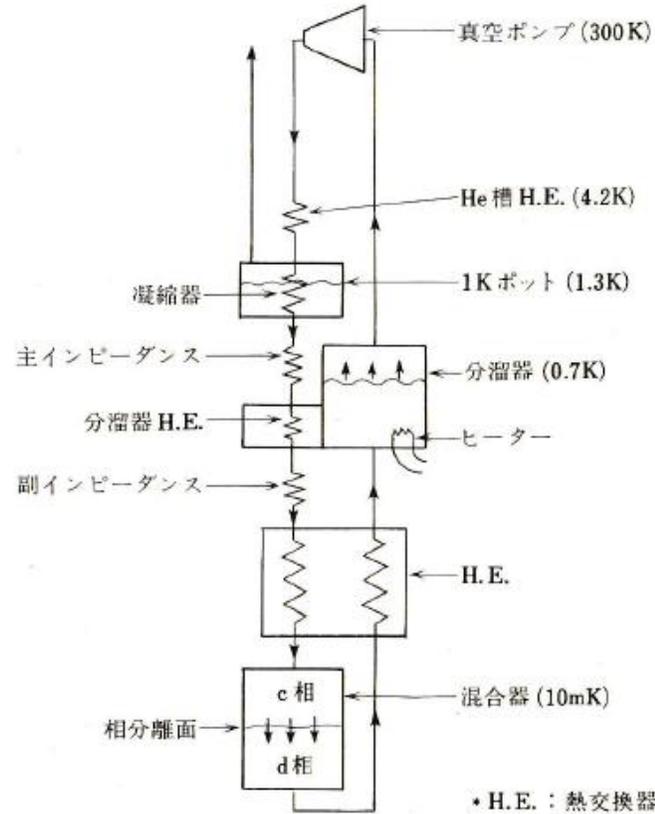


図 9.1 <sup>3</sup>He-<sup>4</sup>He 混合液の相図



量子コンピュータのニュースでよく見る絵

数mKまで下がる。(3 mK までが記録らしい)

ADRに比べパワフル  
10倍くらい強いという認識