



---

# 2010年度 基礎開発研究報告 - 超流動ヘリウムの熱伝達特性 -

超伝導低温工学センター  
木村 誠宏

*A Fundamental Study of He II Heat Transfer  
at Cryogenics Science Center*



---

## 目次

- 研究の概要（2つの柱）
  - ✓ 成果
  - ✓ 今年度の計画



## 研究の概要（2つの柱）

---

- “LHCのルミノシティアップグレードのための高磁場超伝導磁石用超伝導線の電気絶縁に関する基礎研究“

（平成18年～現在、CEA/Scalayと共同研究、枠組み：FJPPL）

- “He II中の膜沸騰の流体力学的安定性の研究”

（平成14年～現在、筑波大学大学院と共同研究）

受領した基礎開発研究費は、上記の研究費として活用

この他に科研費、FJPPL（旅費）等の資金を利用



## 研究テーマ

---

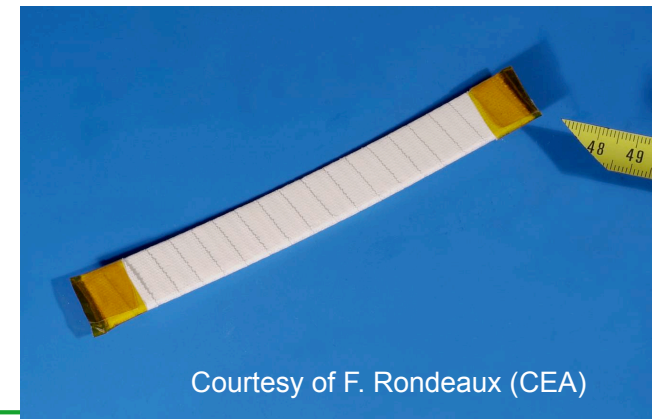
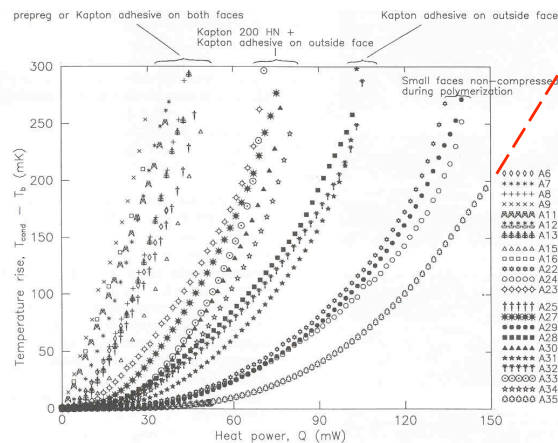
- “LHCのルミノシティアップグレードのための高磁場超伝導磁石用超伝導線の電気絶縁に関する基礎研究“  
(平成18年～現在、CEA/Scalayと共同研究、枠組み：FJPPL)
  
- “He II中の膜沸騰現象の流体力学的安定性の研究”  
(平成14年～現在、筑波大学大学院と共同研究)





# LHCのルミノシティアップグレード

- “Beam losses” of LHC upgrade with Nb<sub>3</sub>Sn Magnets
  - 50 to 80 mW/cm<sup>3</sup> or 2 to 3 W/m (cable) → ΔT~ K with polyimide insulation
  - **Dry insulation for Nb<sub>3</sub>Sn Magnets !**
- **Development of “innovative” ceramic insulation**
  - Thermal treatment (insulation+Nb<sub>3</sub>Sn, easier and less costly construction)
  - Fiberglass + ceramic precursor (CEA patent)
  - Higher heat transfer rate, larger He volume in the insulation (Cp) and heat exchange surface increase (matrix participation)



Courtesy of F. Rondeaux (CEA)



## 研究分担と進捗状況

---

### スタックモデル：KEK&Saclayで共同製作

絶縁材はSaclayが開発、KEKがダミーケーブルの素材とスタック治具を提供

### 実験環境

He II : at Saclay (主に定常状態の発熱を取り扱う)

He I & SHe: at KEK (定常状態と非定常状態を取り扱う)

### 進捗状況

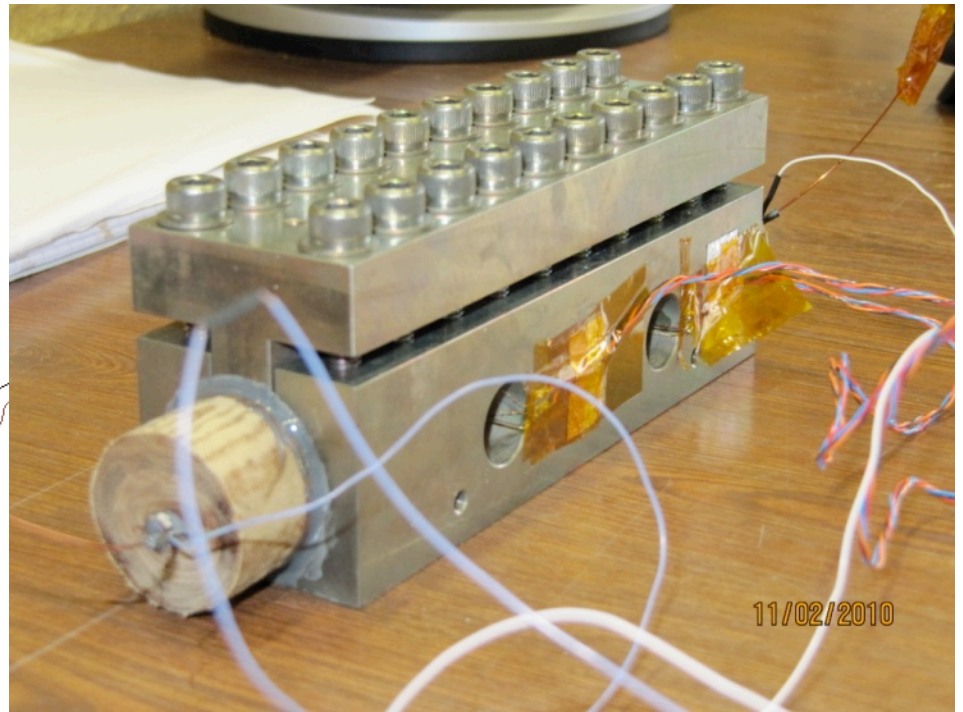
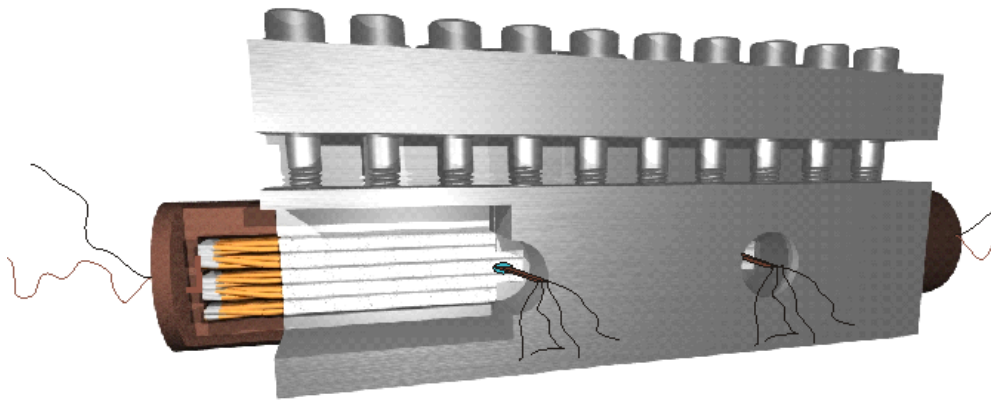
スタックモデル 3台を準備 (ポリイミド1台、Saclay絶縁2台 (10,20MPa))

ポリイミド：He II, He I & SHe (定常、非定常) 測定完了



# The Stack Experiment : A Common tool

- Characterization of the thermal performance of the insulation
  - Central cable instrumented with bare ship sensor





# Saclay絶縁材の熱伝達特性の例

□ Samples tested in He II saturated and pressurized

from 1.7 to 2.1 K

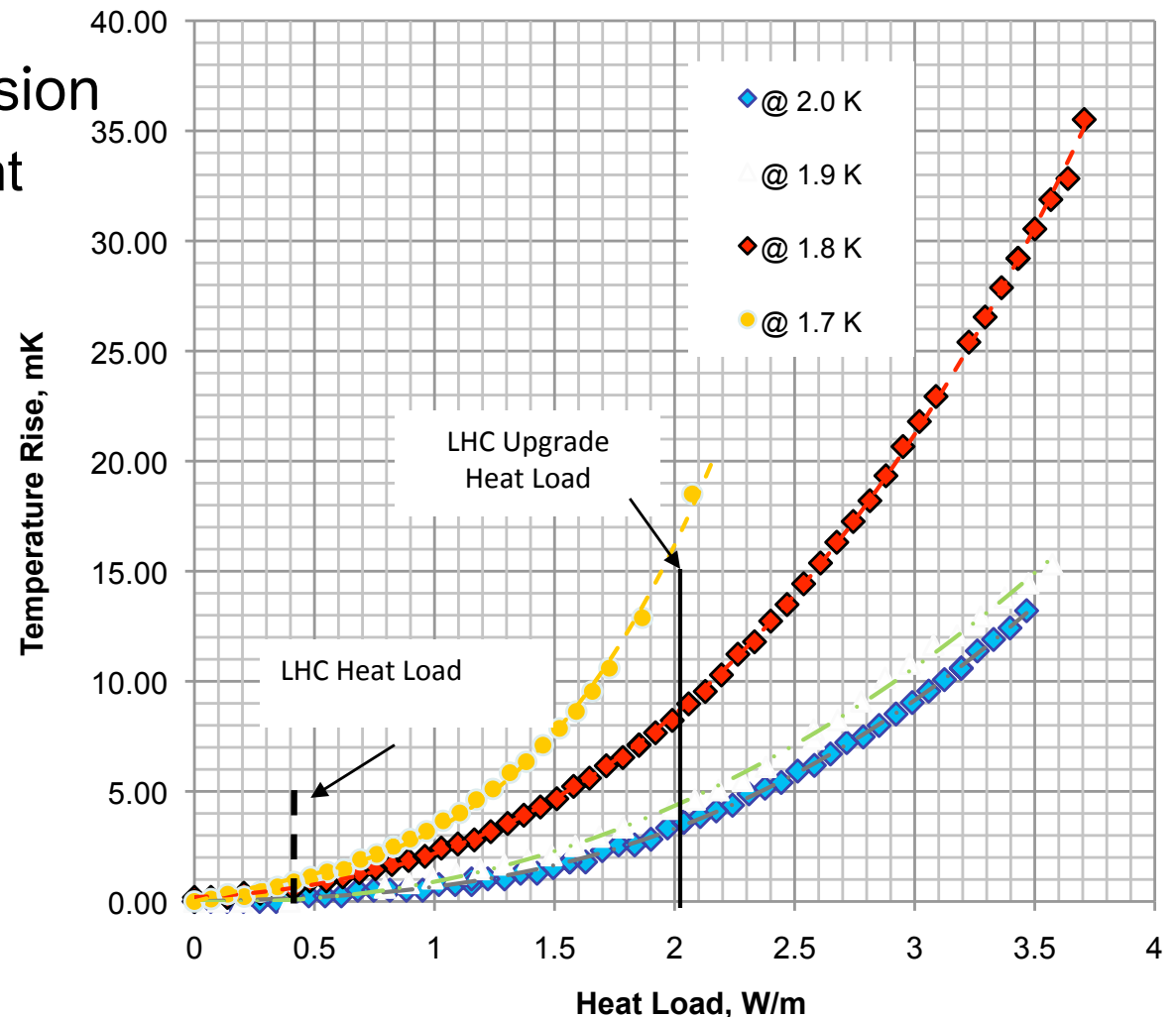
□ 10 and 20 MPa compression

□ Steady-State and transient

□  $\Delta T < 25$  mK for the LHC upgrade heat load

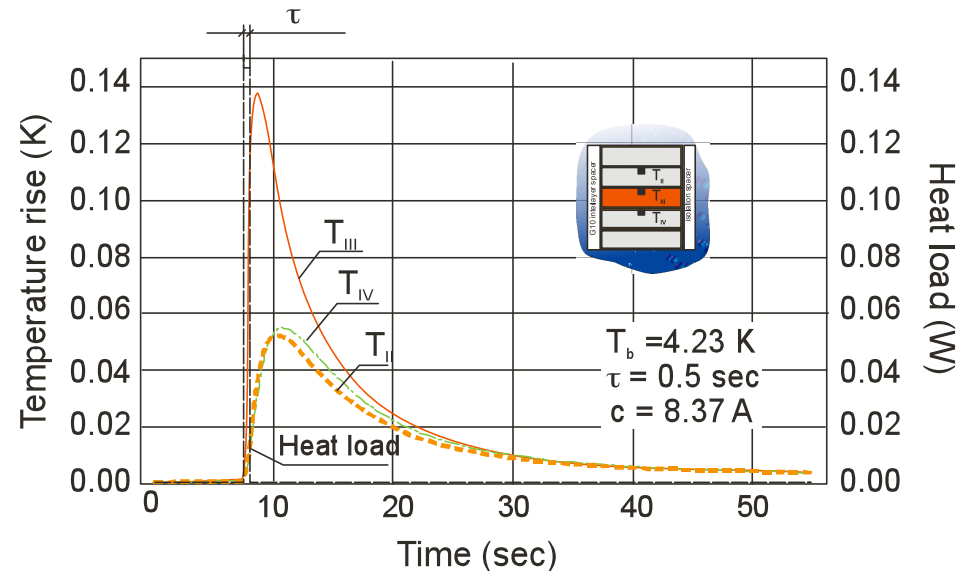
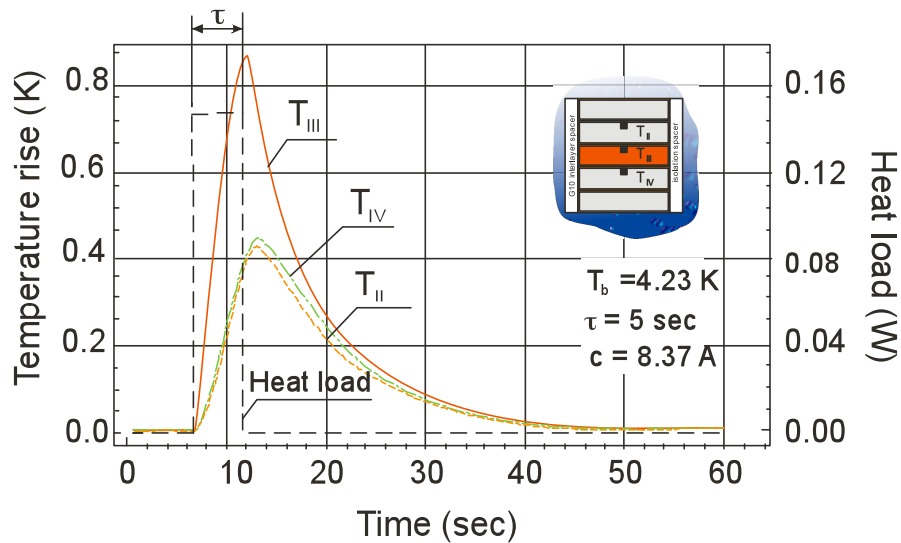
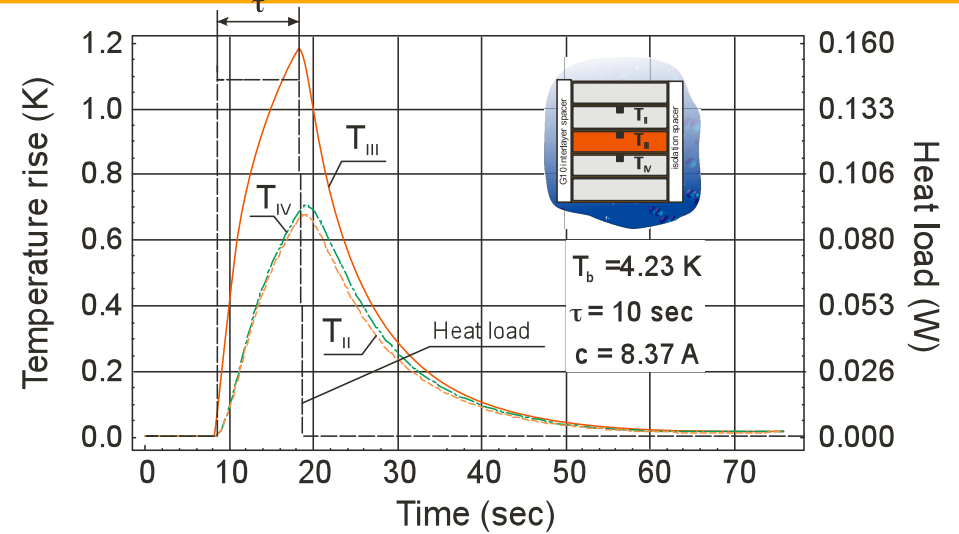
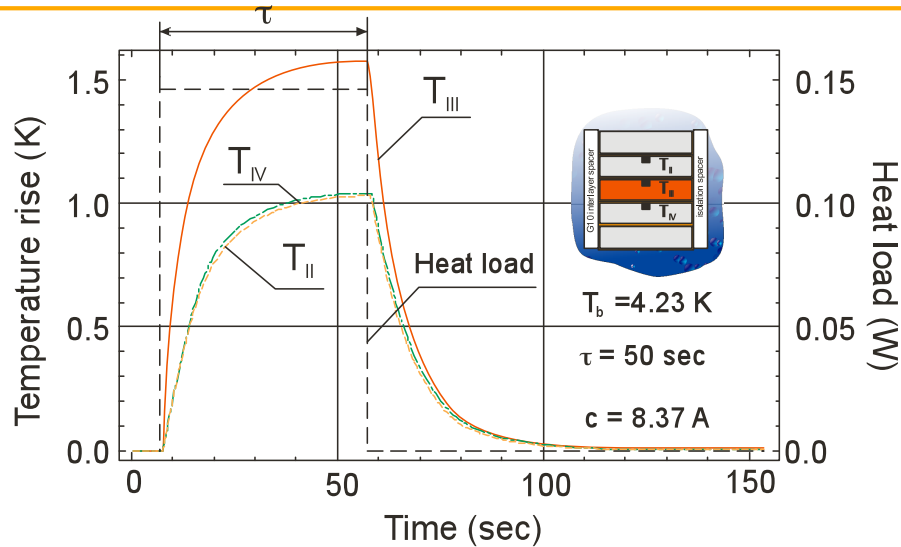
□  $\Delta T < 5$  mK for the current LHC heat load

□ 100 times more efficient than the current insulation!



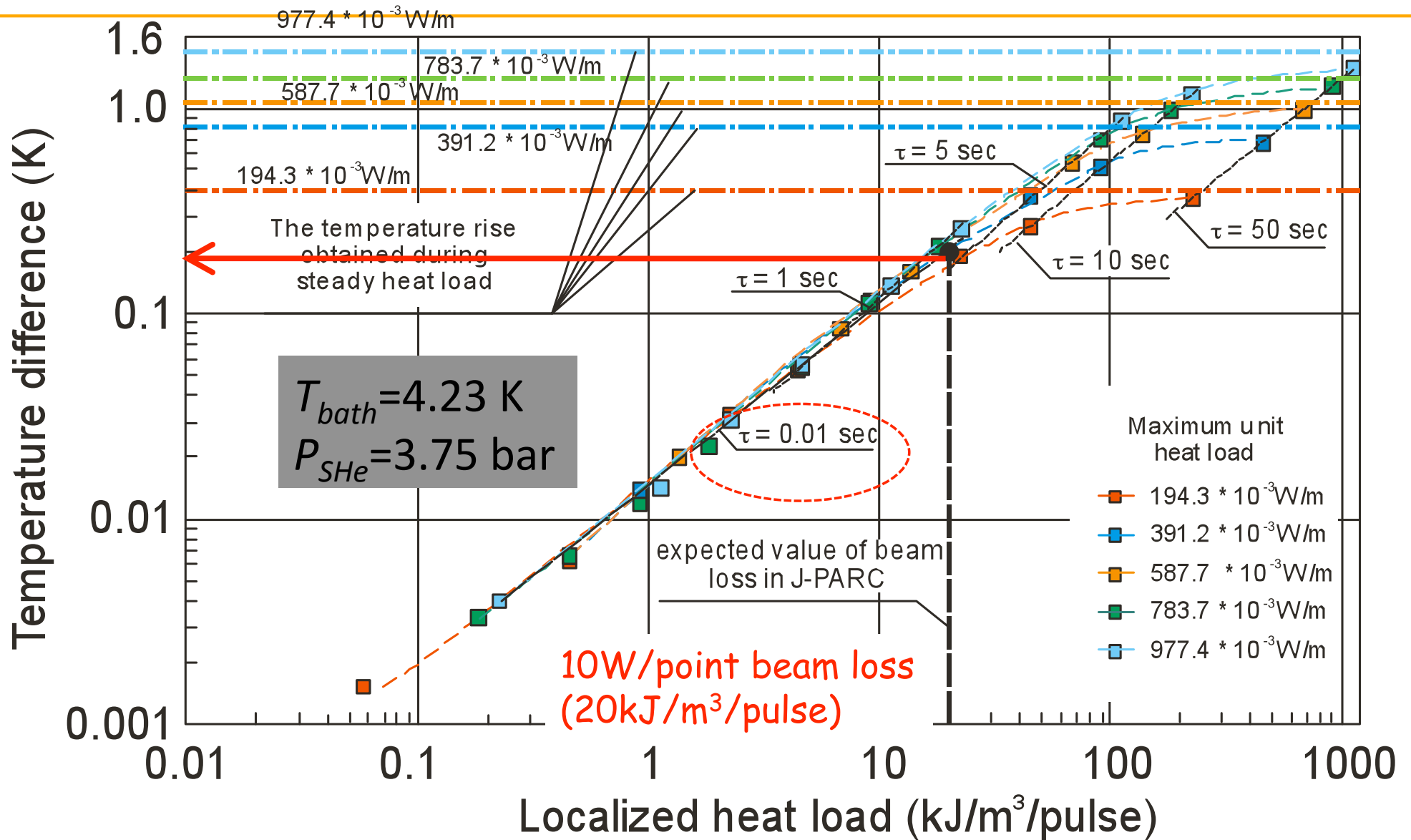


# 超臨界ヘリウム (3,75 bar and 4.23 K) の測定例 (ポリイミド絶縁材)





# The changes of temperature in conductor III for different heat load and frequencies (SHe) (3.75 bar)



It is confirm that temp. diff. by the pulse heat loads asymptotic to steady heat load.



## 今年度の計画

---

### 成果のまとめ

1. ICEC23で報告（今年）
2. Cryogenicsへの投稿

### スタック実験

今秋、Saclayから2名来所、SHe中で定常発熱と非定常発熱を測定  
電気絶縁材単体の熱伝導測定（できれば比熱測定も）の準備  
測定する素材

1. Saclayが開発した絶縁材、セラミックテープ（NbAl用）
2. レジン（シアネートエステル、BTレジン等）

### 測定環境

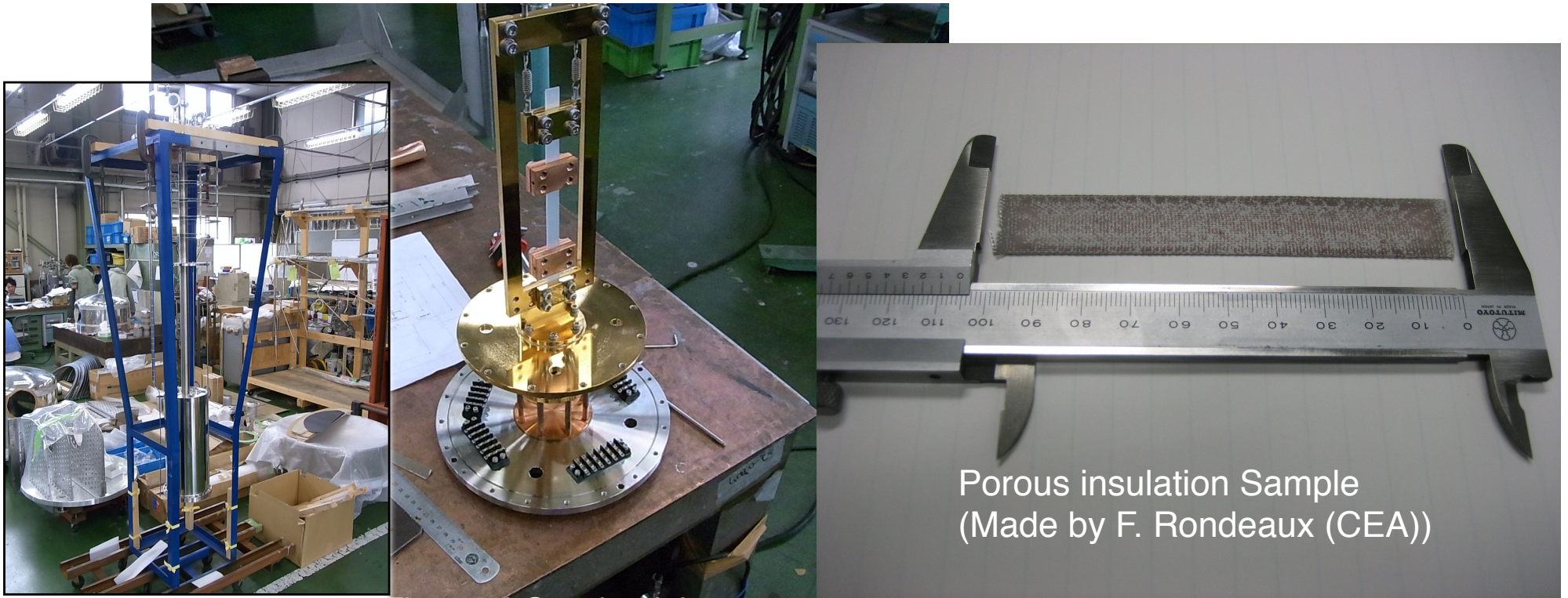
温度 1.6 K ~70 K （He IIからLN2まで）





# 熱伝導測定の準備状況

- Construction of a thermal conductivity measurements rig at KEK
  - The material will be measured from 1.8 K to 77 K
  - Porous insulation constructed at SACM/Irfu
  - Cyanate Ester resin being developed for the Nb<sub>3</sub>Al coil impregnation in KEK
- Both materials have good radiation resistance





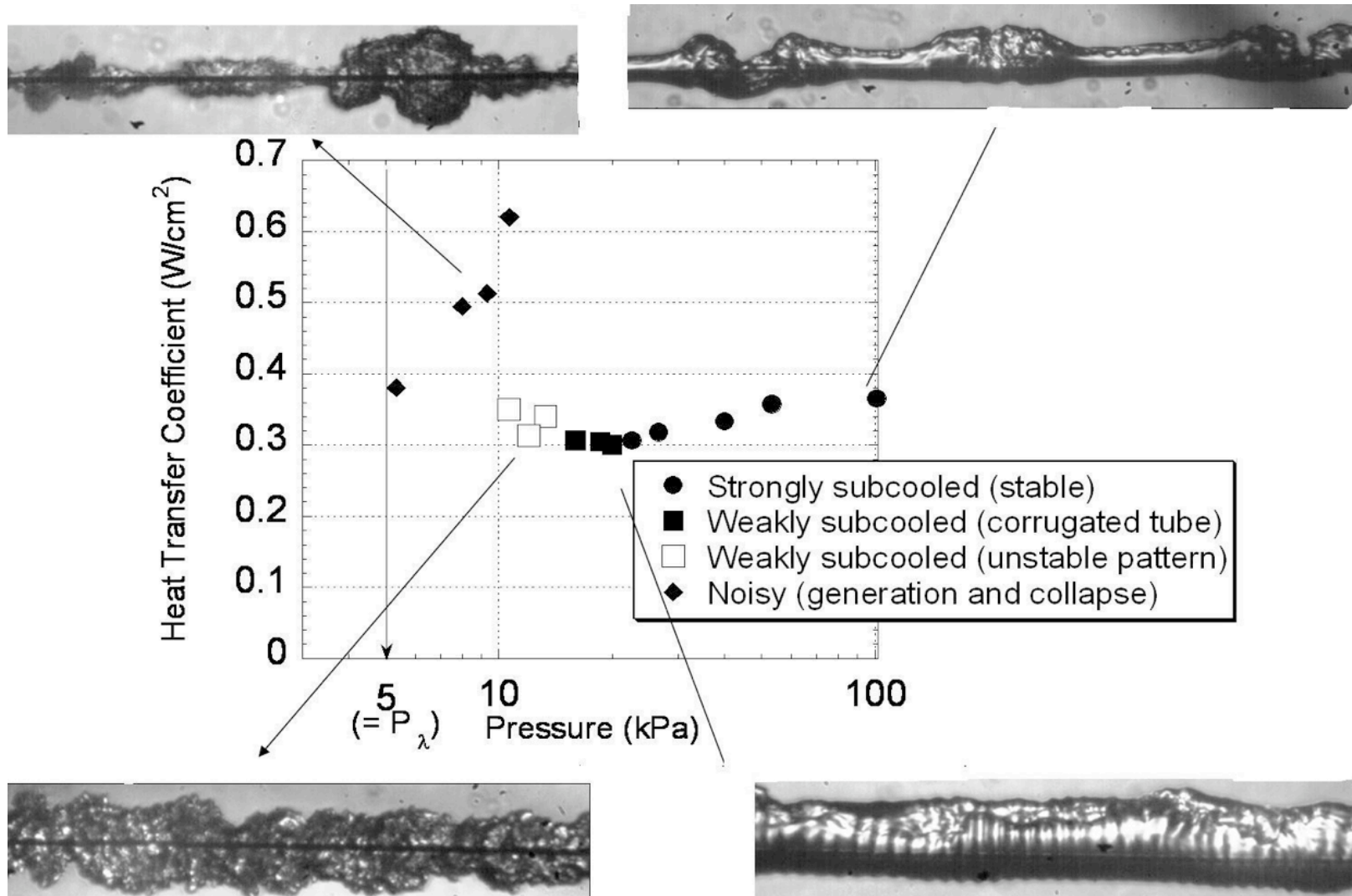


## 研究テーマ

- “LHCのルミノシティアップグレードのための高磁場超伝導磁石用超伝導線の電気絶縁に関する基礎研究“（平成18年～現在、FJPPL）
- “He II中の膜沸騰現象の流体力学的安定性の研究”  
（平成14年～現在、筑波大学大学院）
  1. 科研費（基盤(C)）、平成14年度～平成16年度  
「宇宙用観測機器の冷却に用いる超流動ヘリウムの自励振動の解明と伝熱促進効果の応用」
  2. 科研費（基盤(B)）、平成18年度～平成20年度  
「 $\lambda$ 圧力近傍の超流動ヘリウムで観測される強い伝熱促進効果の解明とその応用」
  - 2' 空白期間、平成21年度（基礎開発研究費で支援を御願い）
  3. 科研費（基盤(B)）、平成22年度～平成24年度  
「微小重力で明らかにされる超流動ヘリウムの特異な膜沸騰の実相と伝熱促進効果の解明」

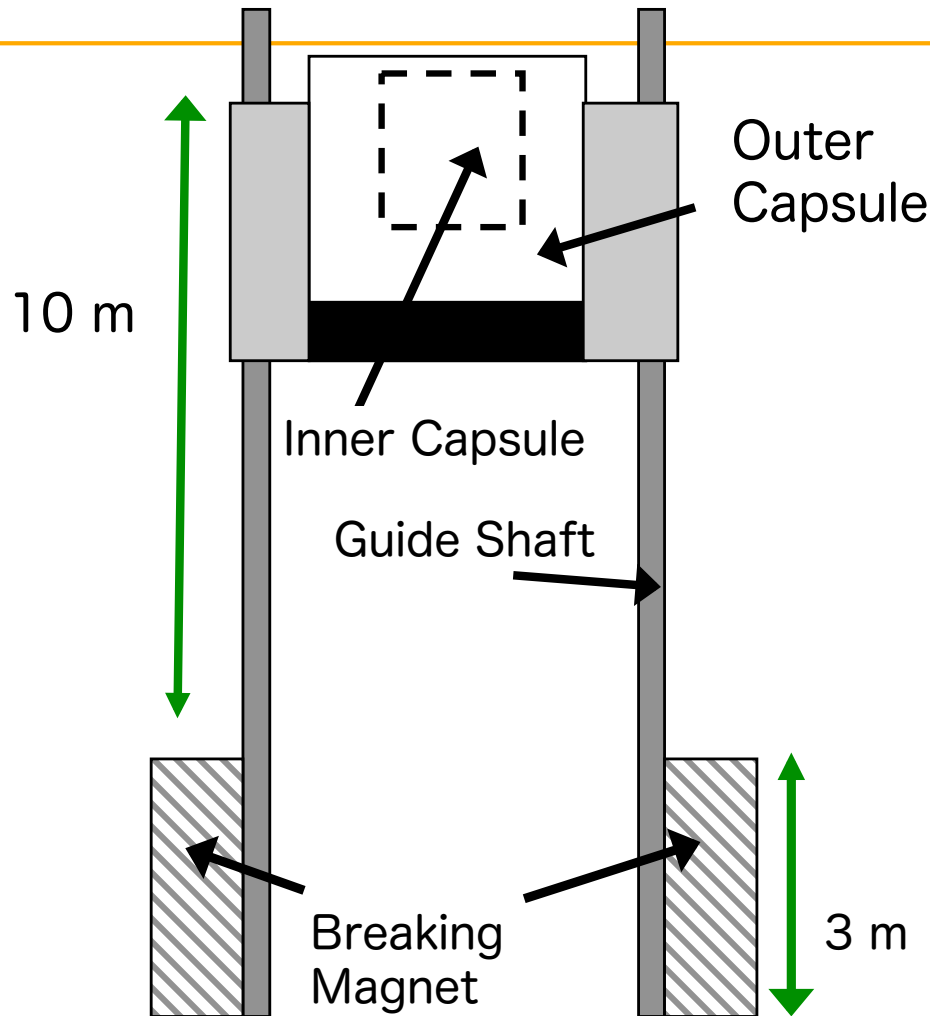


# 可視化法を用いたHe IIの沸騰熱伝達の研究





# 微小重力を利用したHe IIの膜沸騰の可視化



自由落下塔

設置場所：  
ター

産総研北海道セン

形式：  
セル方式

二重カプ

リニアドライブ制動

自由落下距離：

10 m

制動距離：

3 m

微小重力時間

1.2 s

微小重力の質

< 0.001 g

制動加速度

4 g average

( 6 g maximum)

実験機材許容寸法

$\phi 0.72 \times 0.82\text{m}$

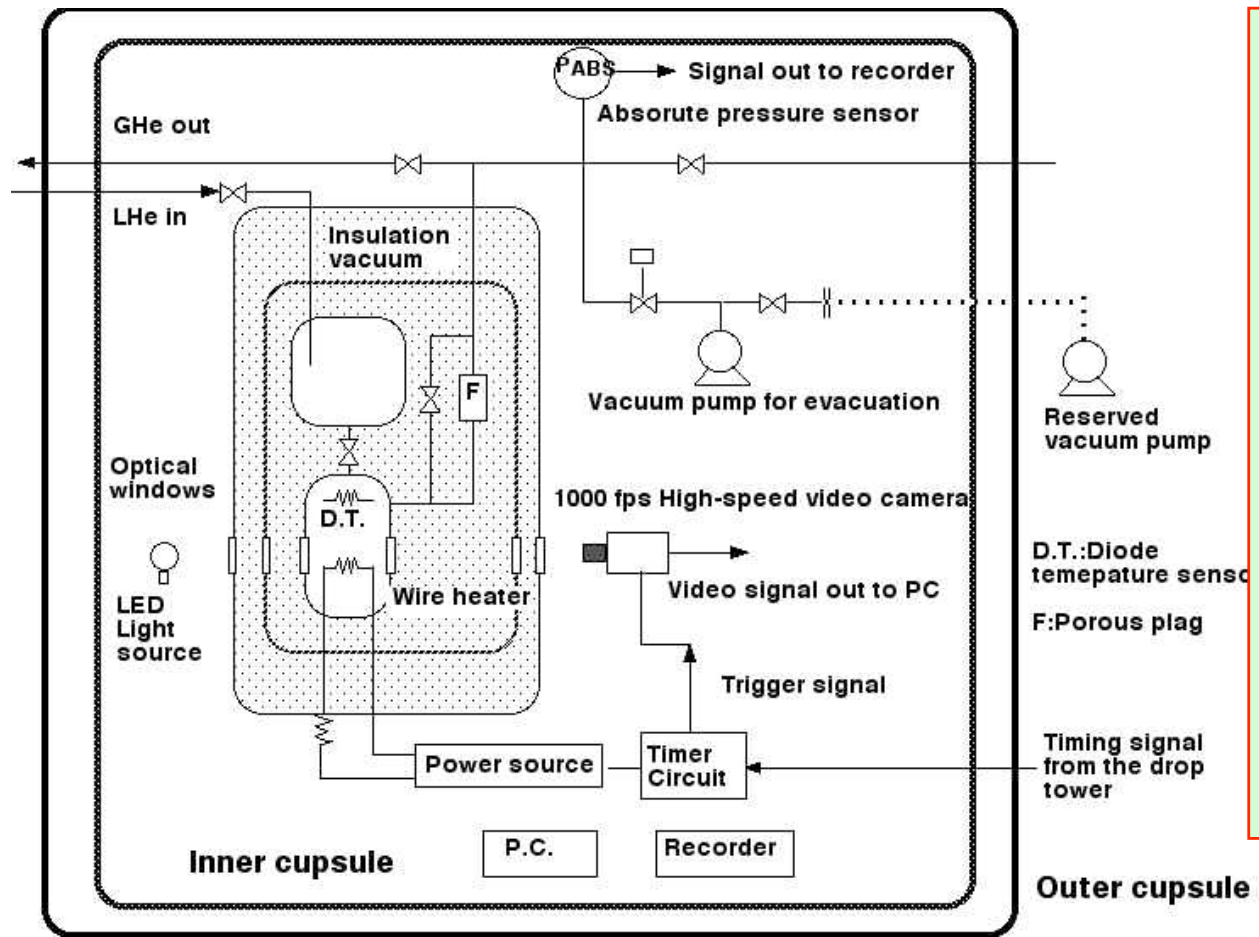
実験機材許容重量

< 100 kg

(including balance

weight)

Simplified illustration of  
the drop tower

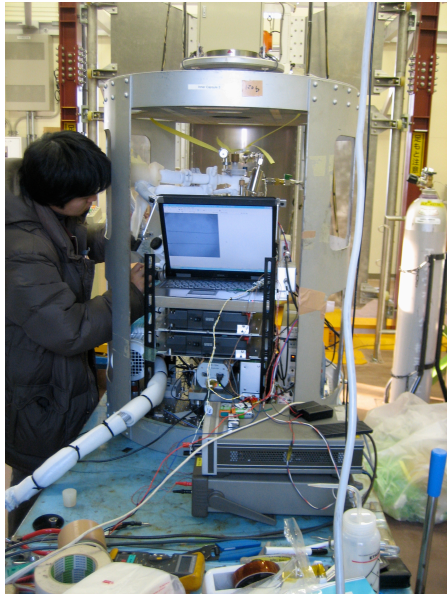


- 構成要素
- 可視化窓付He II クライオスタット
- 高速ビデオカメラ
- ノート PC
- LED 光源
- 記録計
- 減圧用ドライポンプ
- ヒーター加熱用定電力電源 (平成21年度購入)
- タイミング回路
- 3軸加速度センサー

落下実験用He II可視化システムの構成



# 落下実験の手順



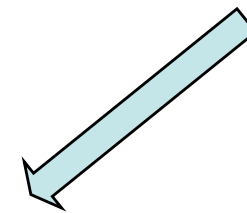
予冷とセットアップ~2日



カプセル内組み込み  
~0.5日

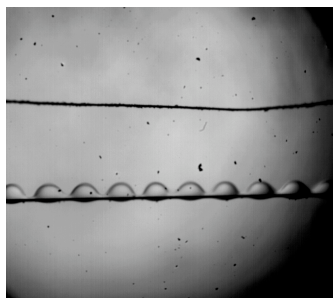


外部カプセル閉鎖

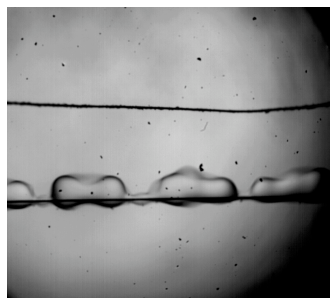


カプセルの落下と回収  
~15分

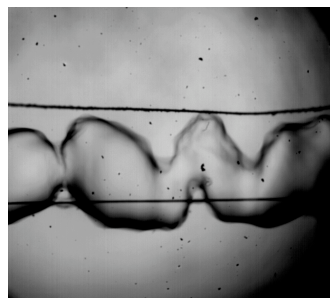
# 実験結果



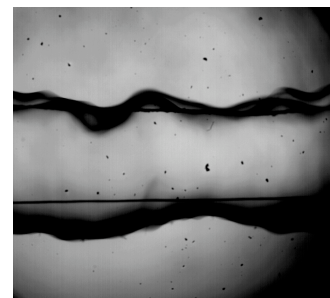
②  $t=1.18$   
sec



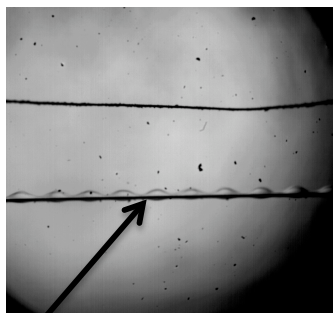
③  $t=1.19$   
sec



④  $t=1.23$   
sec

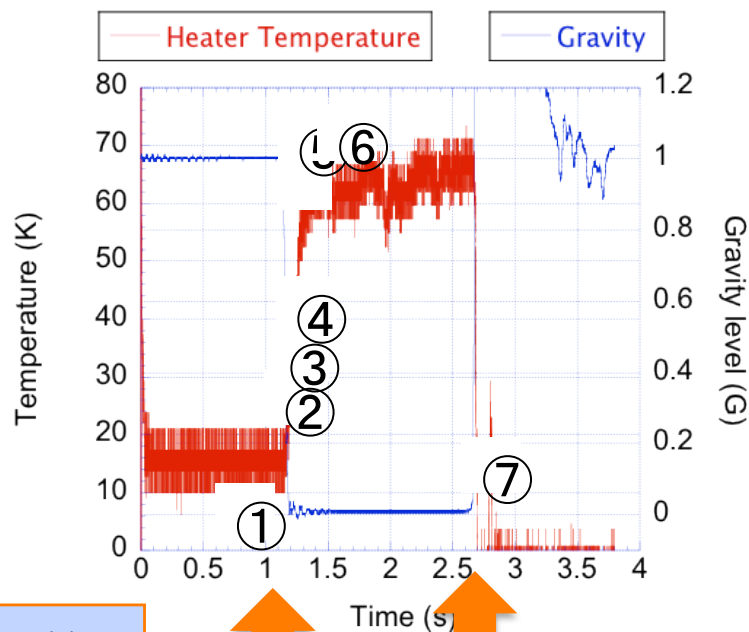


⑤  $t=1.30$   
sec



①  $t=0.81$   
sec

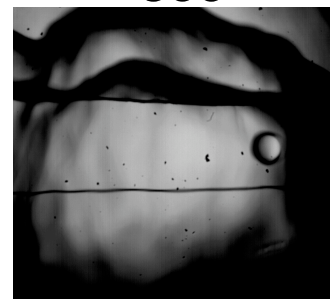
50  $\mu\text{m}$  径  
マンガン線



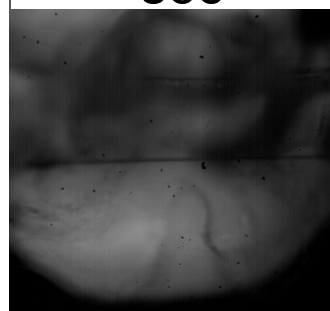
実験開始

落下開始

落下終了



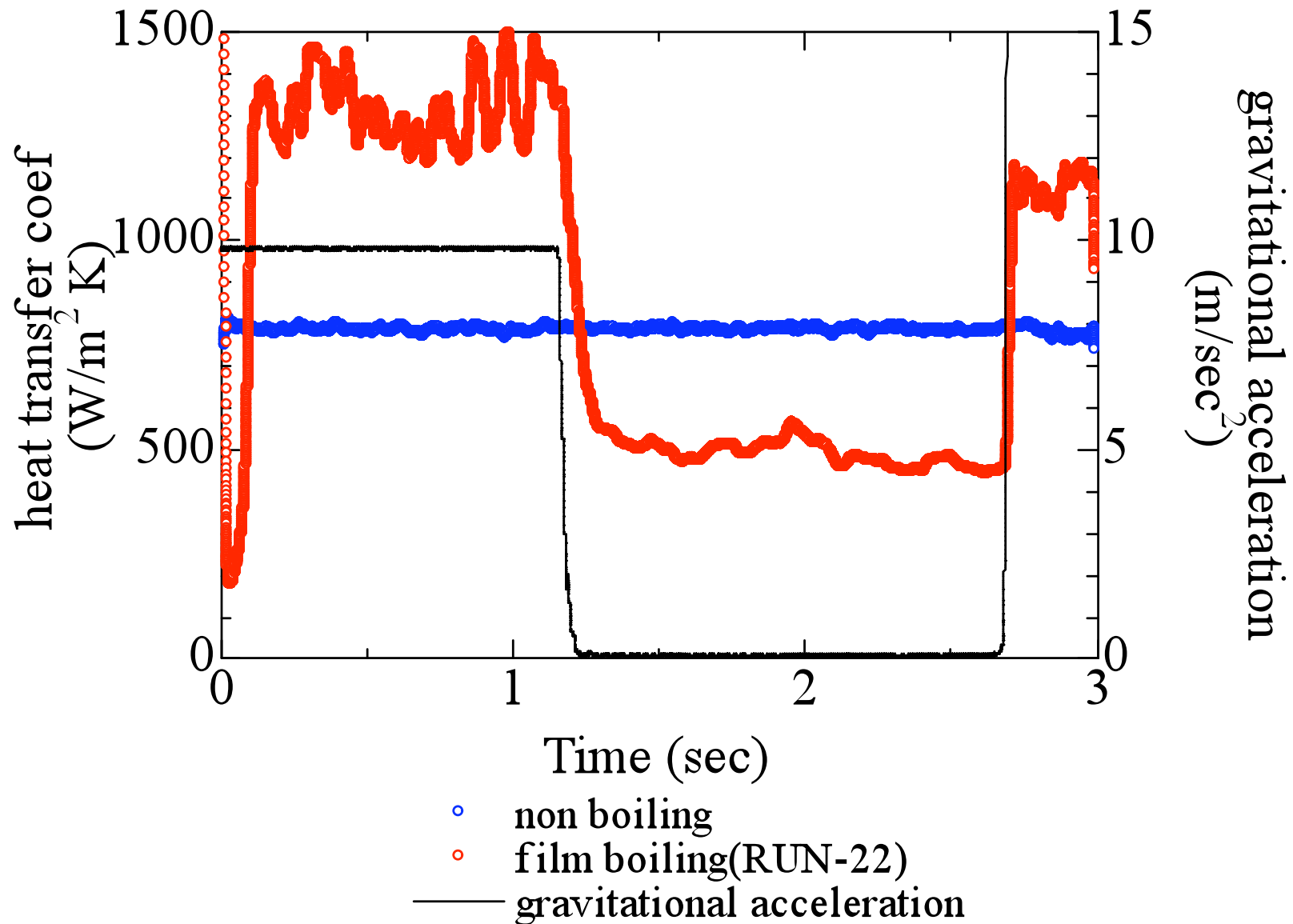
⑥  $t=1.64$   
sec



⑦  $t=2.72$   
sec

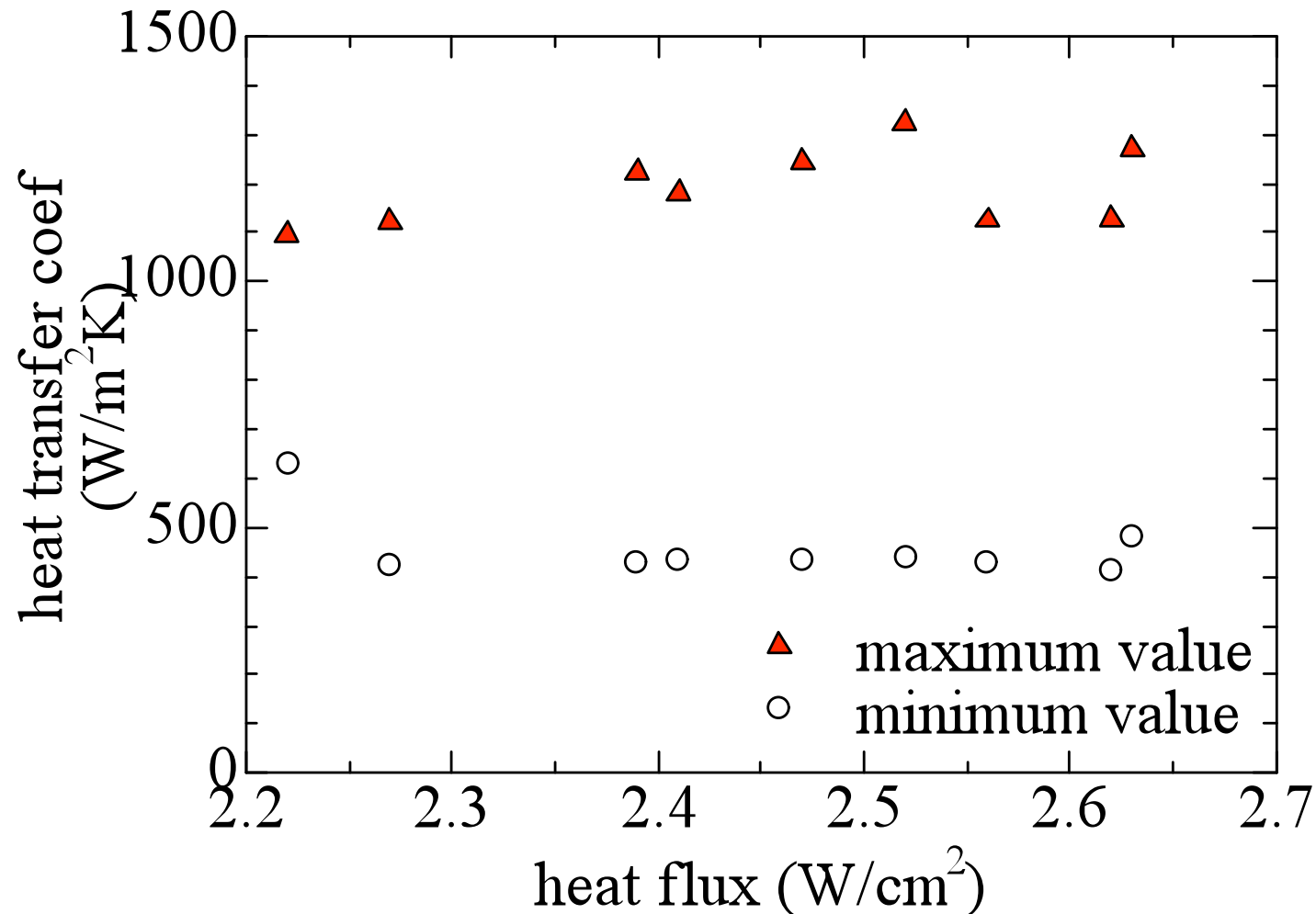


# 熱伝達係数のg依存性





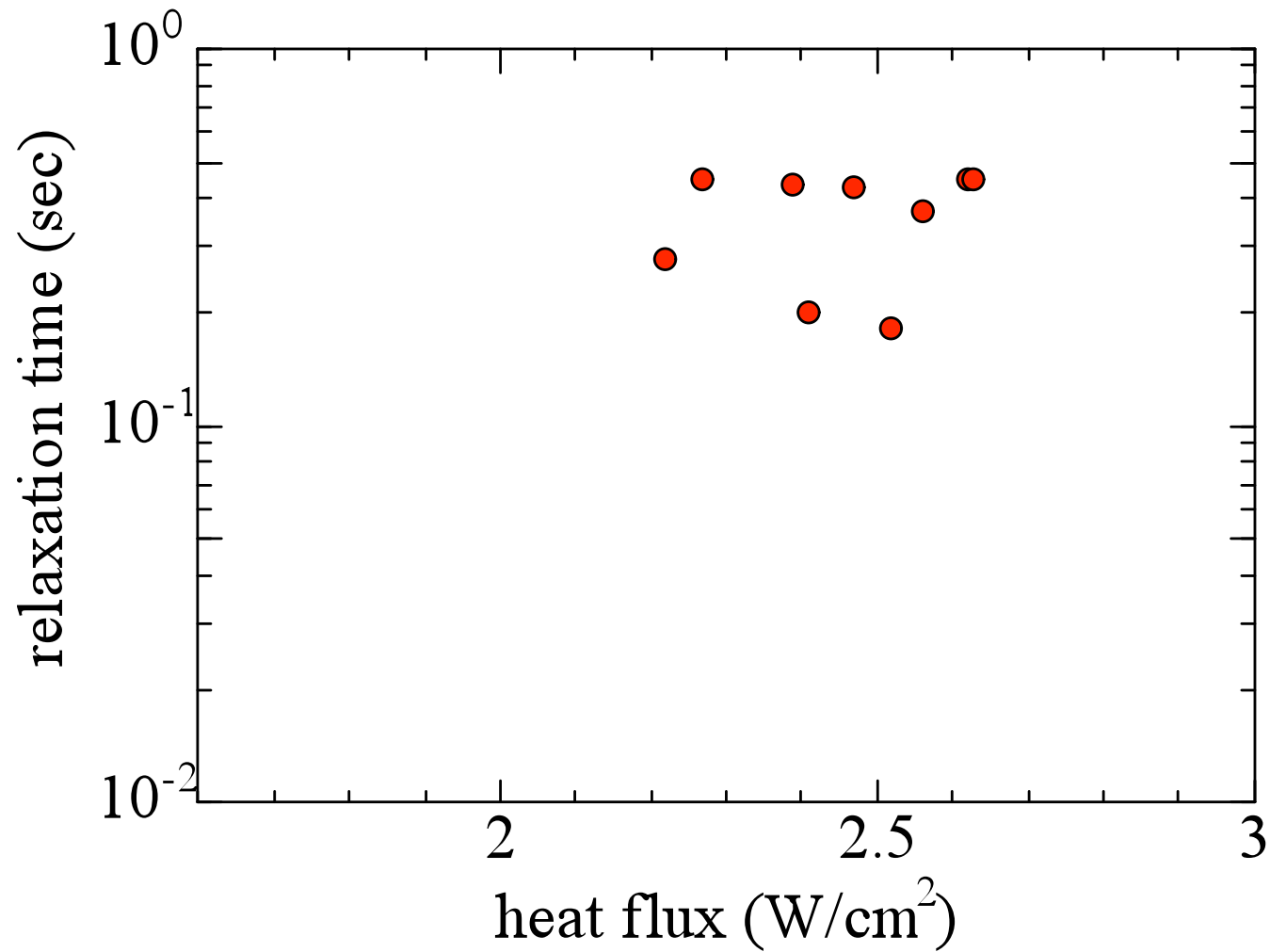
# 熱伝達係数のg依存性







# 定常までの緩和時間





## 今年度の計画

---

データ解析（続行中、週1回）

高田、岡村、木村の3名

成果報告

1. ICEC23（今年）
2. 秋の超電導低温工学会
3. Cryogenicsへの投稿

落下実験（2年継続：年1回を予定）

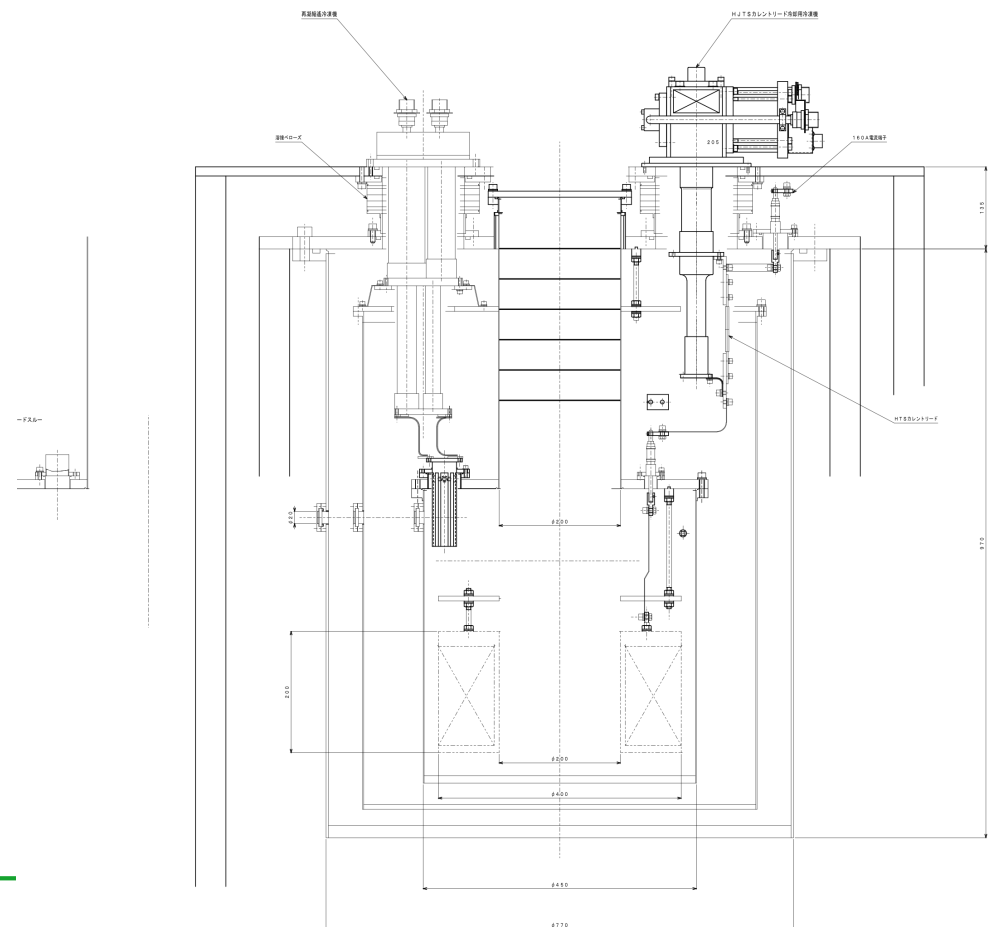


# R&D of Low vibration cooling system

- We are jointed g-2/EDM solenoid group, and co-operated R&D to develop low vibration cooling system.
- A few money are founded from Cryogenics Science Center for R&D.

In one year:

- build prototype of cooling system
- study how to reduce vibration in *thermo siphon cooling system*
- Yamaoka-san join R&D group, and will design a suspension flame for cold head for R&D.





---

# Appendix

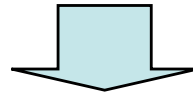


## *Stack Experiment using Saclay stack model under SHe (An experiment result on Helium thermodynamics effect)*

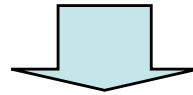
---

The heat load on superconducting magnet induced by beam loss is a major subject to be solved for stable operation such as J-PARC neutrino beam line.

Acceptable beam loss in view of shielding and maintenance has to be investigated



Calculate **heat load** for a **10 W/point beam loss** in the cable by **MARS CODE**

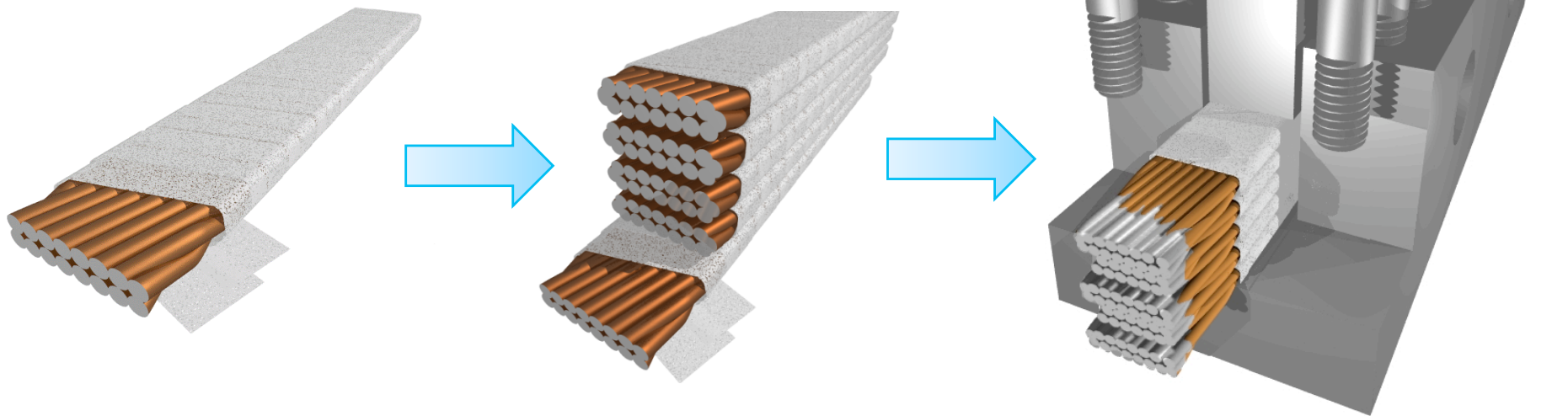


**Measurements** of temperature rise of the cable with a mock up model under various pressures of SHe and saturated Helium.



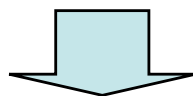
# The Stack Experiment : A Common tool

- Characterization of the thermal performance of the insulation
  - “real cable” geometry (CuNi cable)
  - Real electrical insulation
  - Mechanical constraints (compression)
  - Heat transfer configuration (Joule heating)

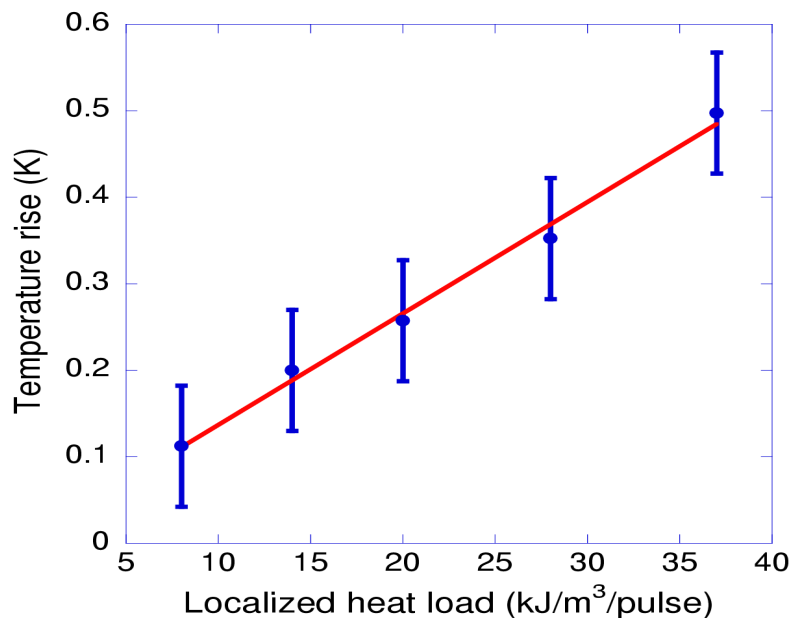




When heat load in coil was induced to  $20 \text{ kJ/m}^3/\text{pulse}$ ,  
Instantaneous temp. rise in the cable = 0.22 K



These results were consistent with previous experiment\*



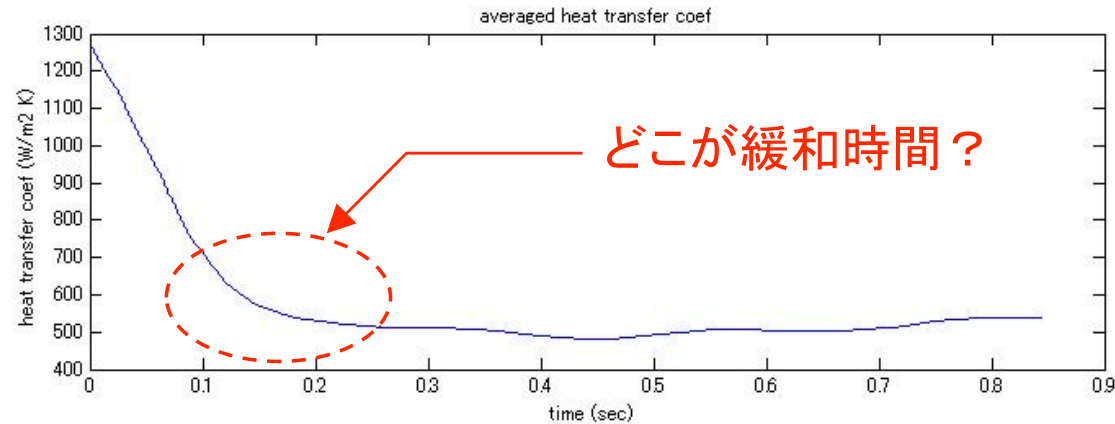
$20 \text{ kJ/m}^3/\text{pulse}$  for a  $50\text{GeV}-10\text{W}$  loss  
Instantaneous temp. rise =  $0.25 \text{ K}$

\*Ref.: Y. Iwamoto, N. Kimura, et al.;  
"Quench Stability against Beam-loss in  
Superconducting Magnets at the 50  
Gev Proton Beam Line for the J-PARC  
Neutrino Experiment",  
*IEEE Trans. on Appl. Supercond.* **14**  
(2004) pp.592-595

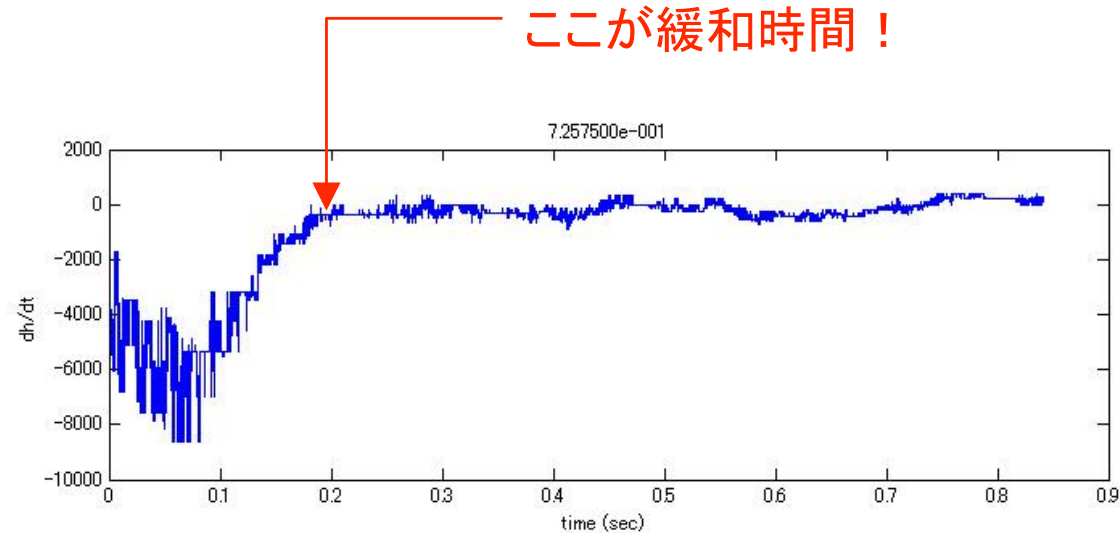
**Temp. rise is proportional  
to heat load.**



# 緩和時間決定の仕方



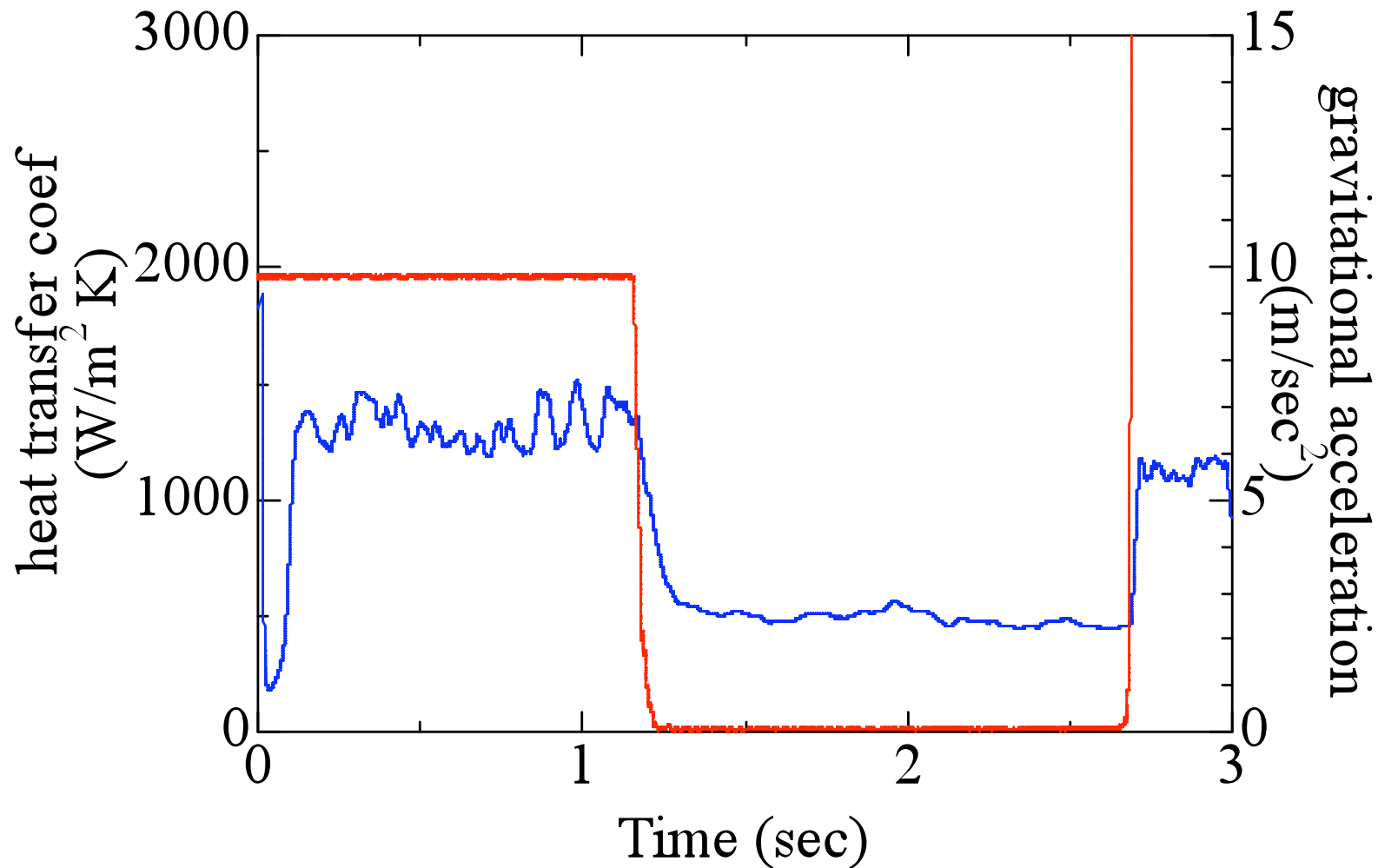
熱伝達係数の時間微分を考える。ゼロになったときに着目！  
ノイズ成分によりゼロになることもあるので、これは除く。







# 定常状態までの緩和過程





# The Stack Experiment : A Common tool

## □ Characterization of the thermal performance of the magnet insulation

- “real cable” geometry (CuNi cable)
- Real electrical insulation
- Mechanical constraints (compression)
- Heat transfer configuration (Joule heating)

