

二〇一四年七月一日

(火)
日直
仲井

第8回 ILCを学び考える会

ILCのクライオジエニックスについて考える

加速器研究施設 仲井浩孝

二〇一四年七月一日

(火)
日直
仲井

学び考える内容

1. ILCのクライオジェニクス（低温工学）
2. ILC-TDR（技術設計報告書）でのクライオ
ジェニクス
 - CERN-LHCのヘリウム冷却システム
 - 日本候補地（山岳地帯）での検討
3. 2Kヘリウム冷却システム
 - STF棟のヘリウム冷却システム
4. 今後の課題

二〇一四年七月一日(火)

日直
仲井

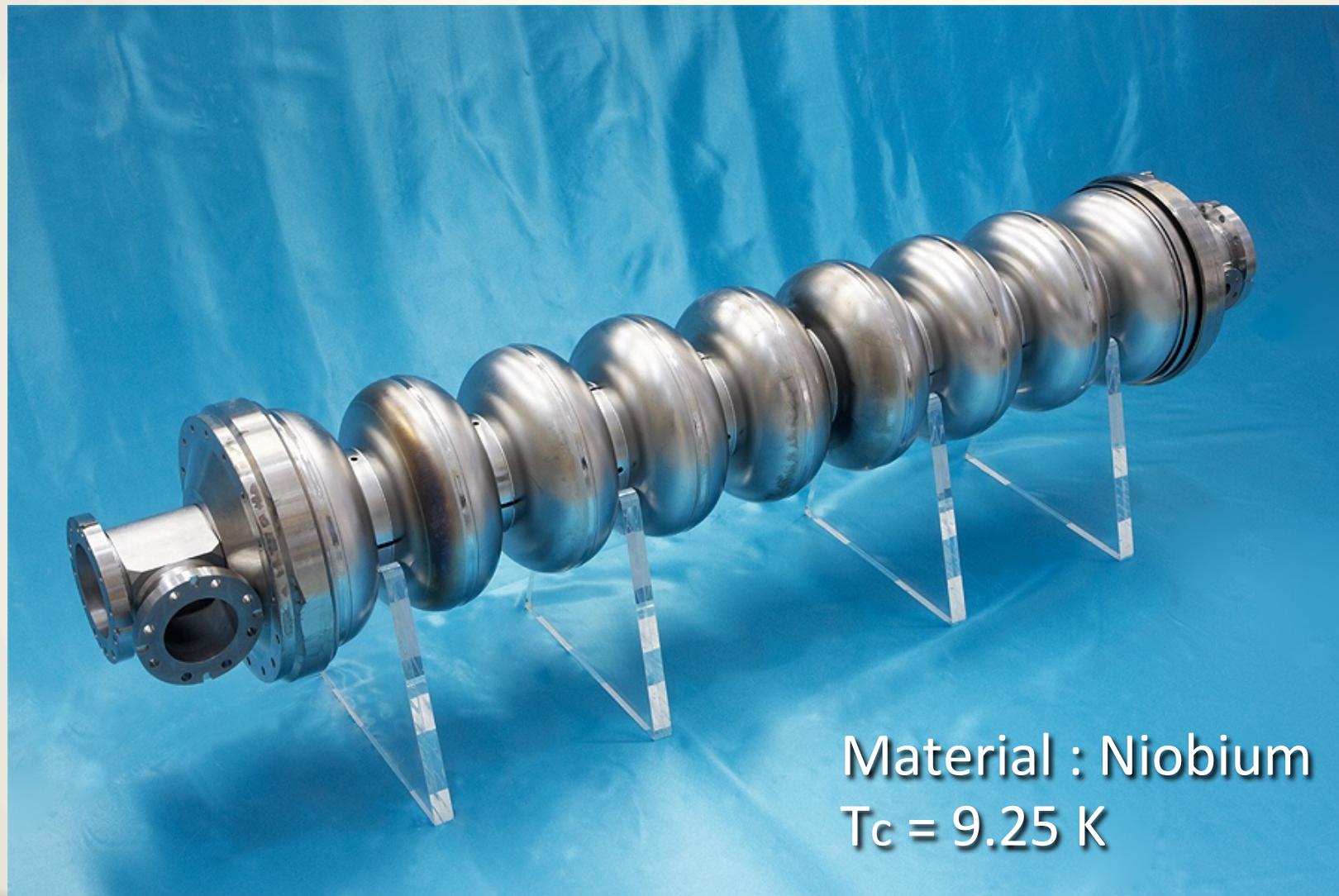
お断り

- ★ ここで議論は主線型加速器のヘリウム冷却システムのみ
- ★ 他に衝突点に検出器やダンピングリングの超伝導加速空洞および超伝導電磁石用のヘリウム冷却システムがある
- ★ 衝突点のヘリウム冷却システムは素核研低温グループが担当(?)
 - ILC全ての冷却システムを1つのグループが担当すべきとの意見あり

A

7

3



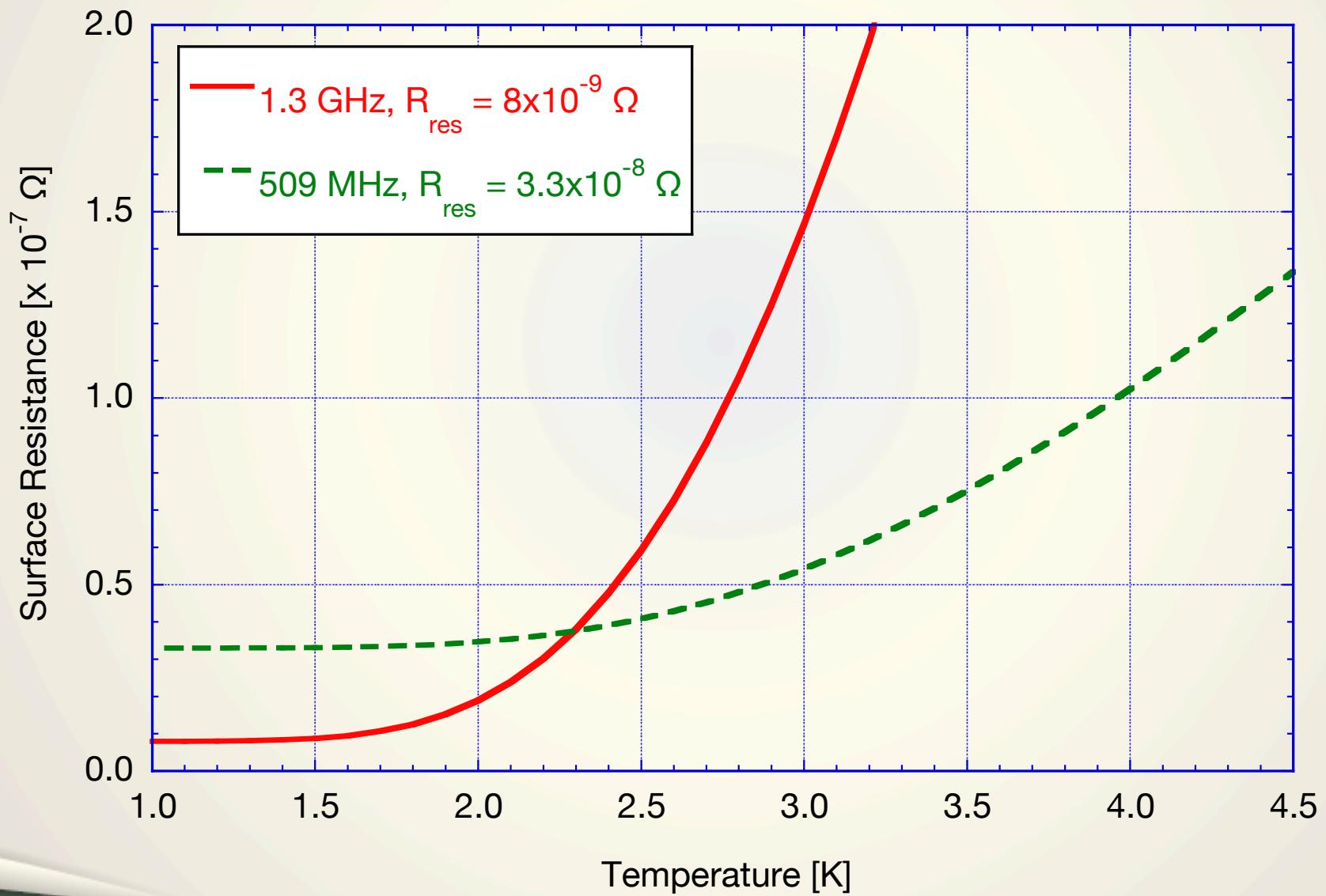
Material : Niobium
 $T_c = 9.25 \text{ K}$

2

4

仲井

1. 3GHz 9セル超伝導加速空洞(ニオブ製)



空洞の表面抵抗の周波数および温度依存

仲
井

二〇一四年七月一日

(火)

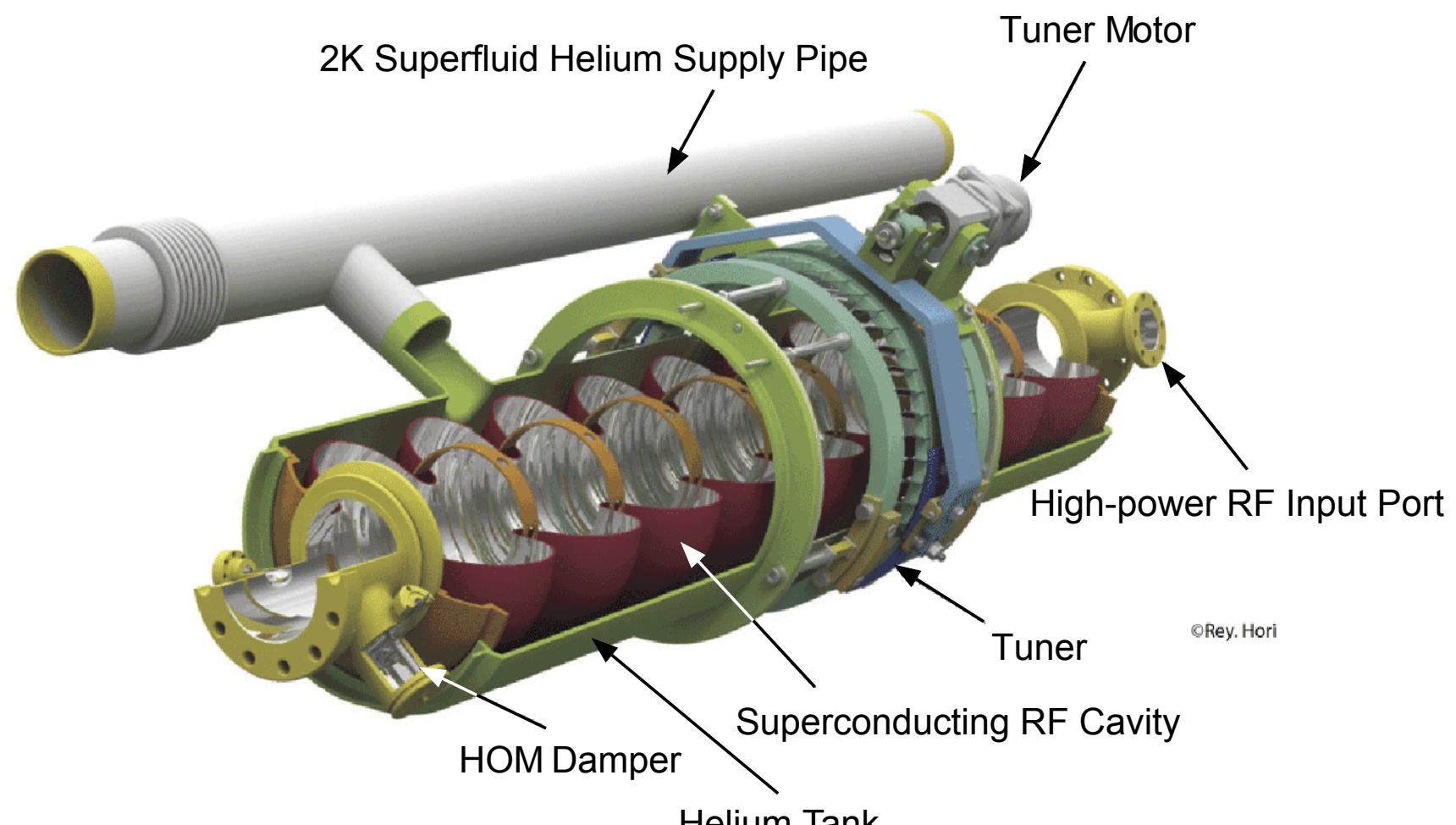
日直

仲井

超伝導加速空洞の運転温度

- ★ 空洞からの発熱量(空洞損失, 高周波損失)は表面抵抗に比例
- ★ 表面抵抗はBCS抵抗と残留抵抗の和
- ★ BCS抵抗は空洞の運転温度に依存
- ★ 共振周波数が高くなるほど運転温度を低くする必要あり
 - 1. 3GHz超伝導空洞→2K以下の運転

A



7

ILC超伝導加速空洞周りの機器

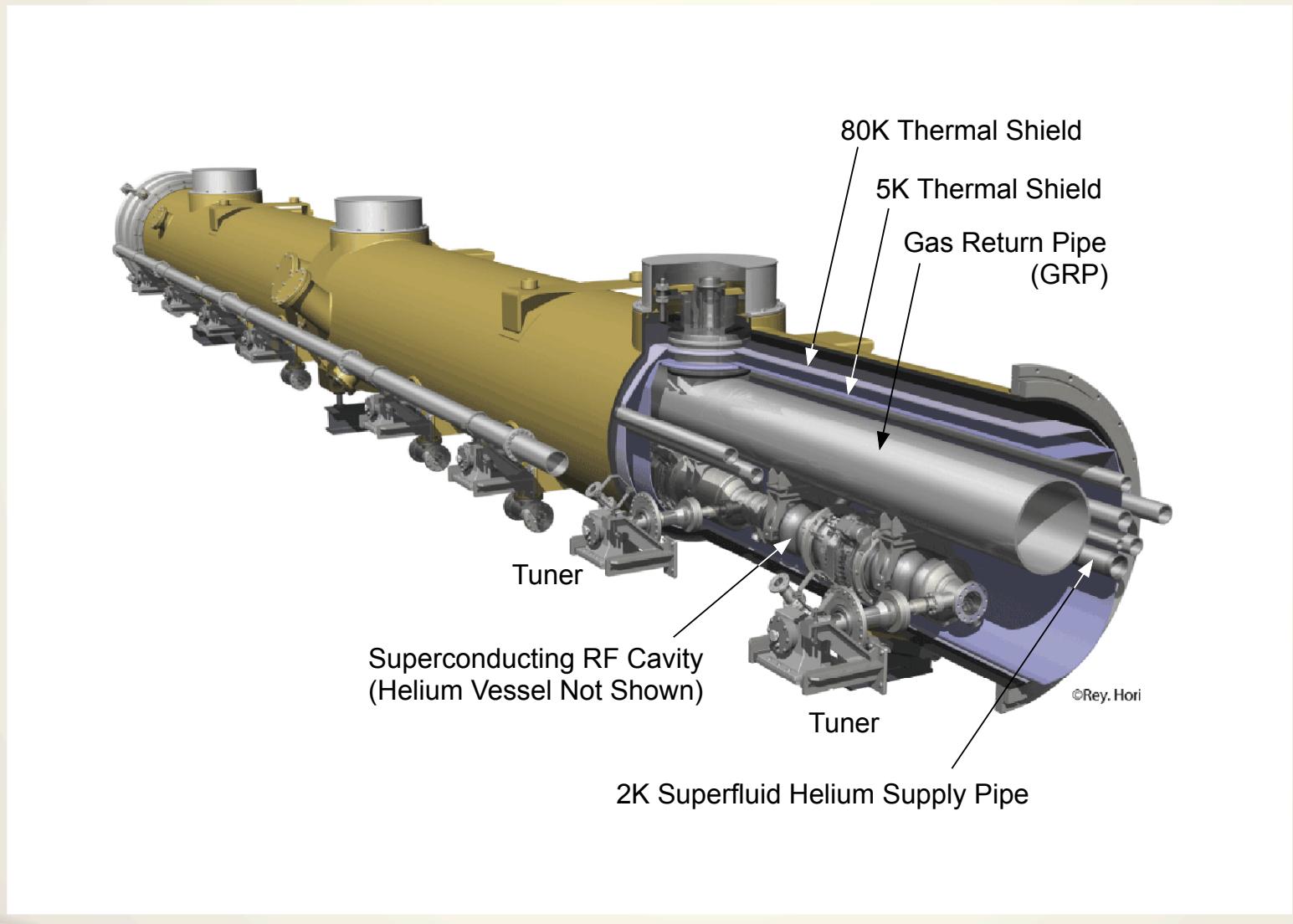
仲井

A

2

7

3

仲
井

ILC クライオモジュールの構造

300mm Gas Return Pipe

Support post

Vacuum vessel

Helium tank
(sectioned)

gas-cooled
sc quadrupole
(not shown)

1.3 GHz cavity

Type-A : 9-cell cavities x 9

Type-B : 9-cell cavities x 8 +
superconducting quadrupole magnet x 1

Cited from ILC-TDR

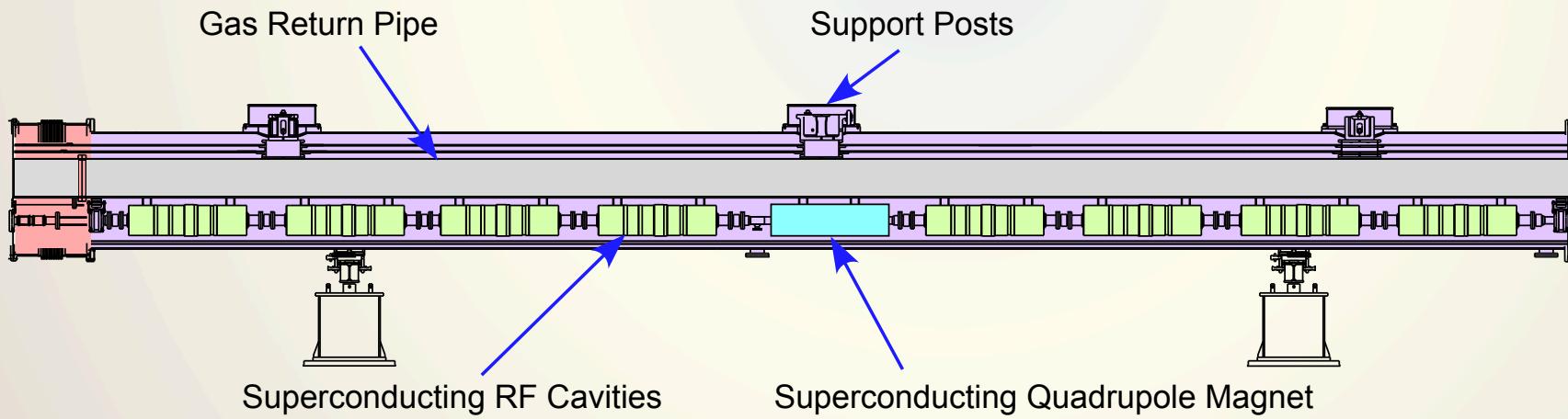
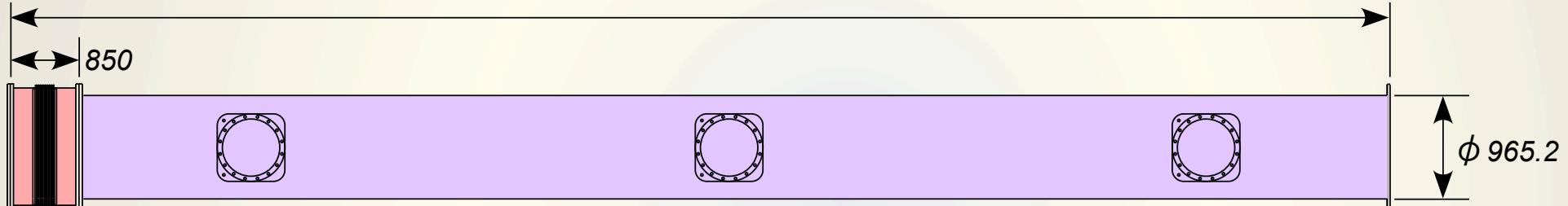
ILC クライオモジュールの構成

仲井

A

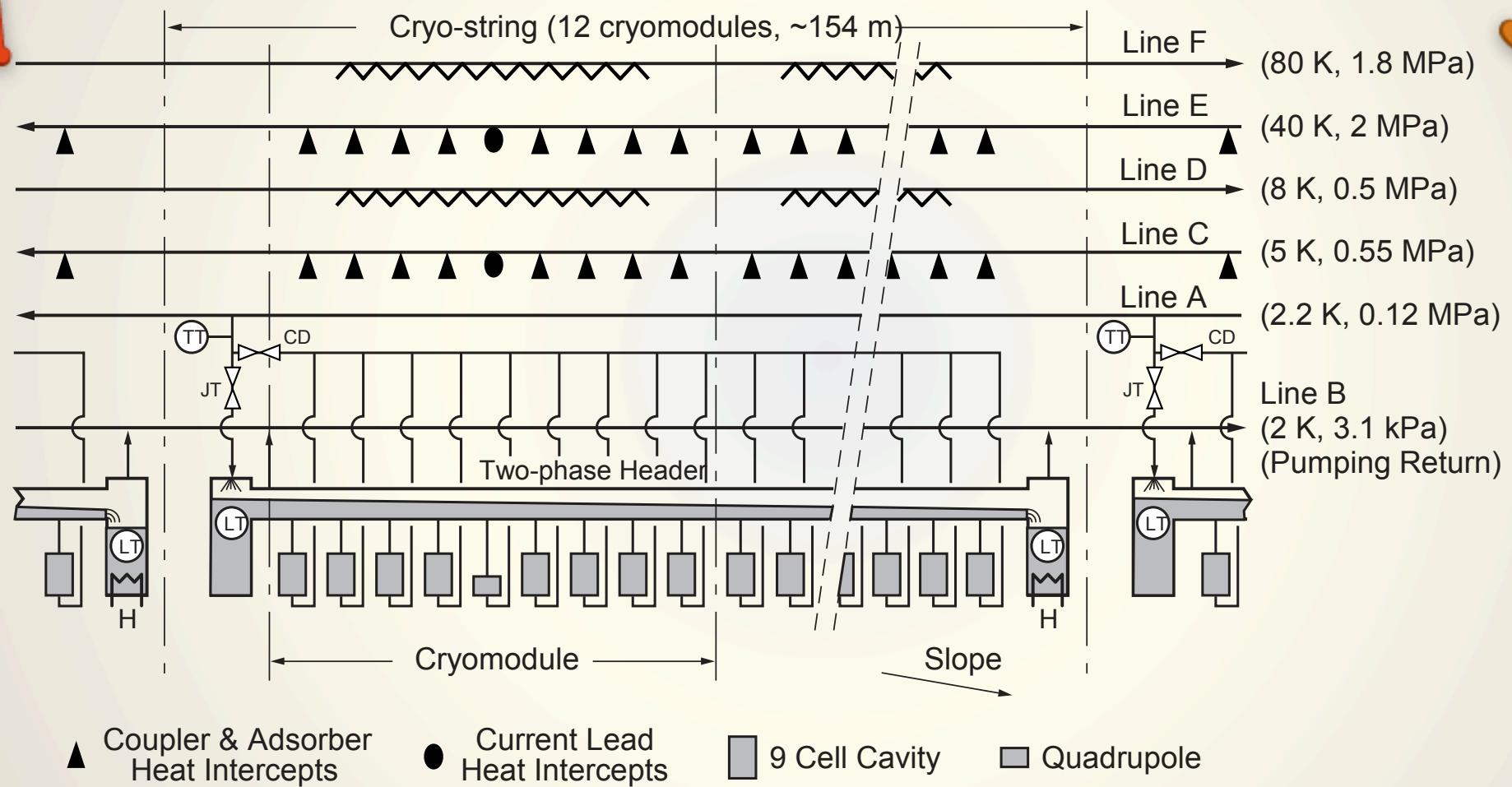
3

12652



A

3



2
▲ Coupler & Adsorber
Heat Intercepts

● Current Lead
Heat Intercepts

■ 9 Cell Cavity

■ Quadrupole

④ M H Heater

④ T Temperature Sensor

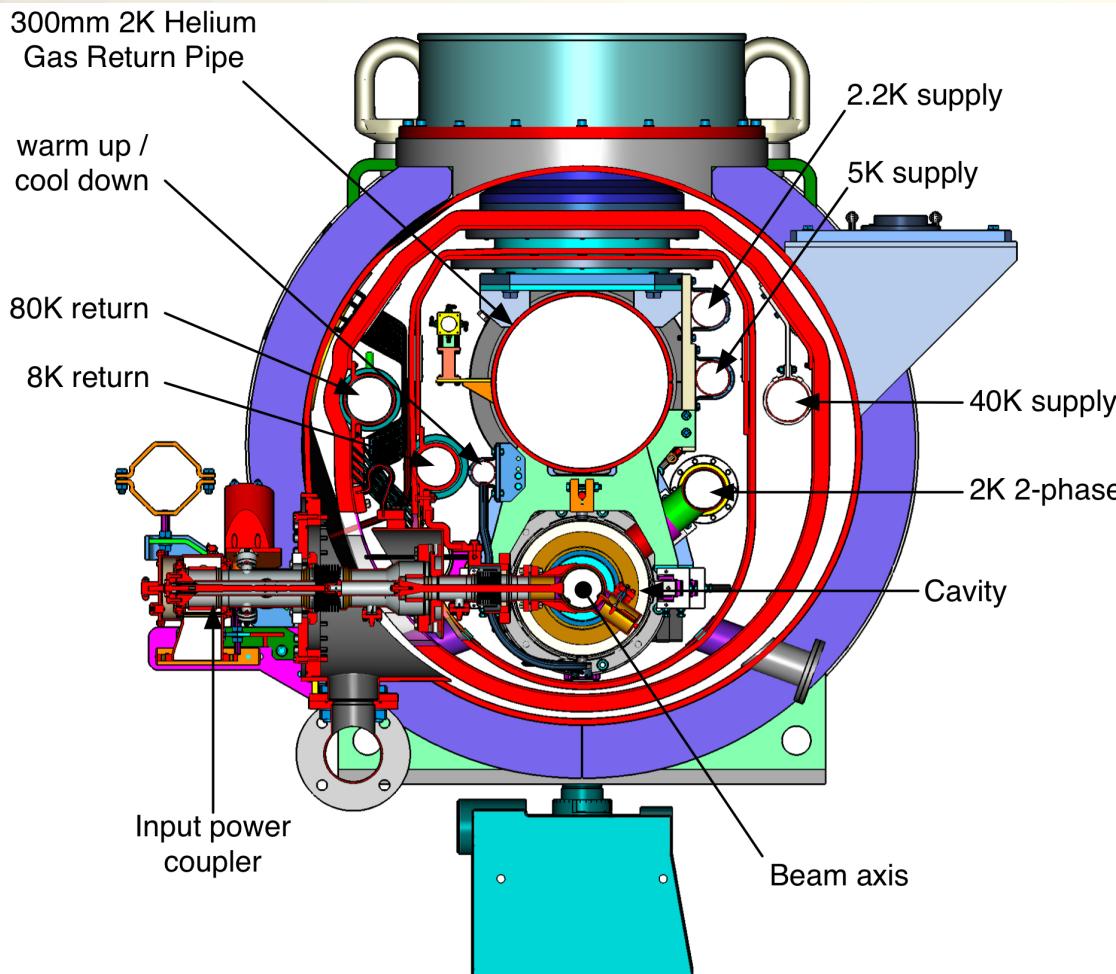
④ LT SC Level Sensor

~~ Screens or Shields

Cited from ILC-TDR

仲
井

ILC クライオモジュールの冷却系

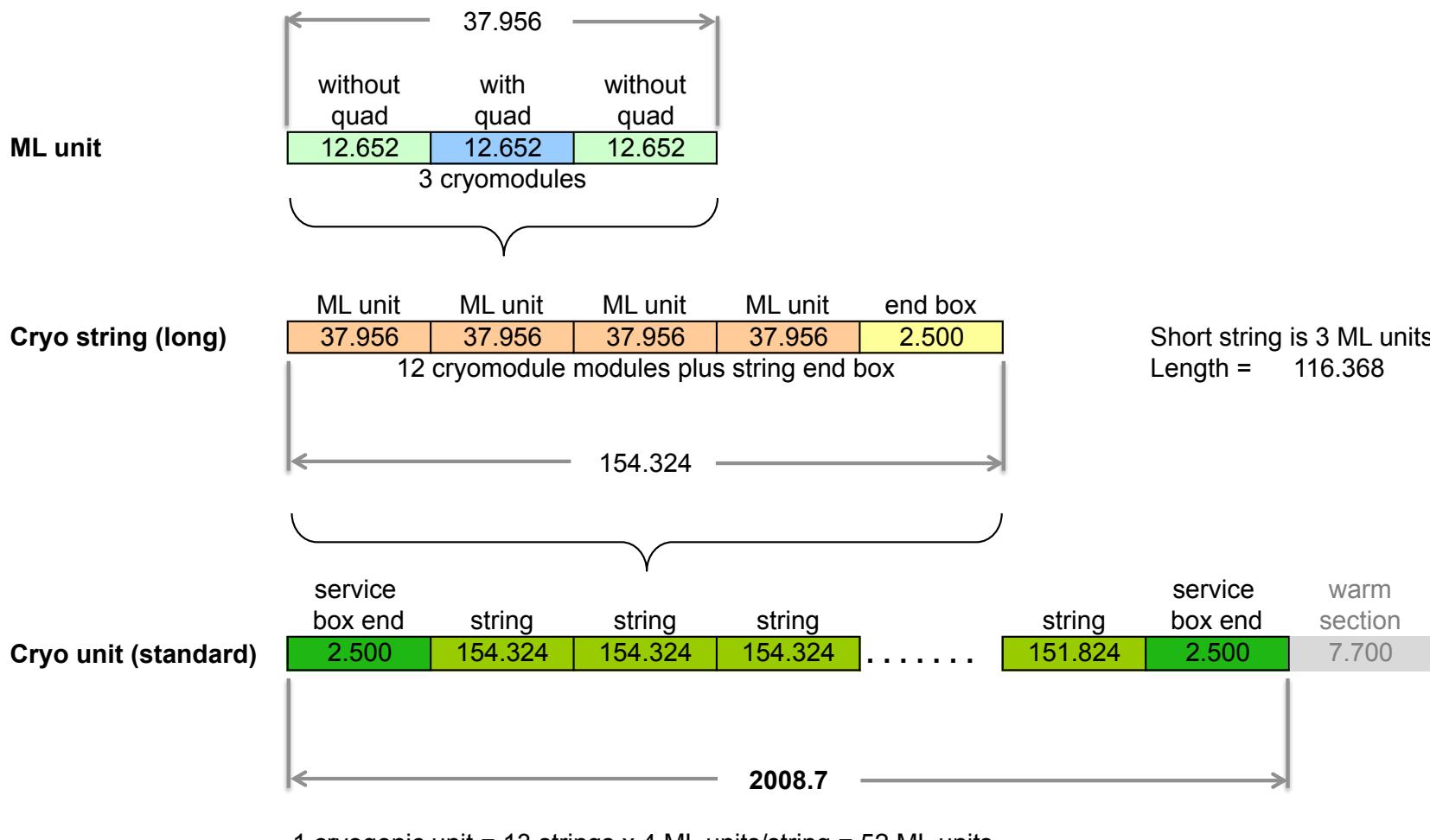


2K 2-phase pipe
 2K helium gas return pipe
 5K supply line
 8K return line
 (5K thermal radiation shield)
 40K supply line (80K supply)
 80K return line
 (40K thermal radiation shield)

Cited from ILC-TDR

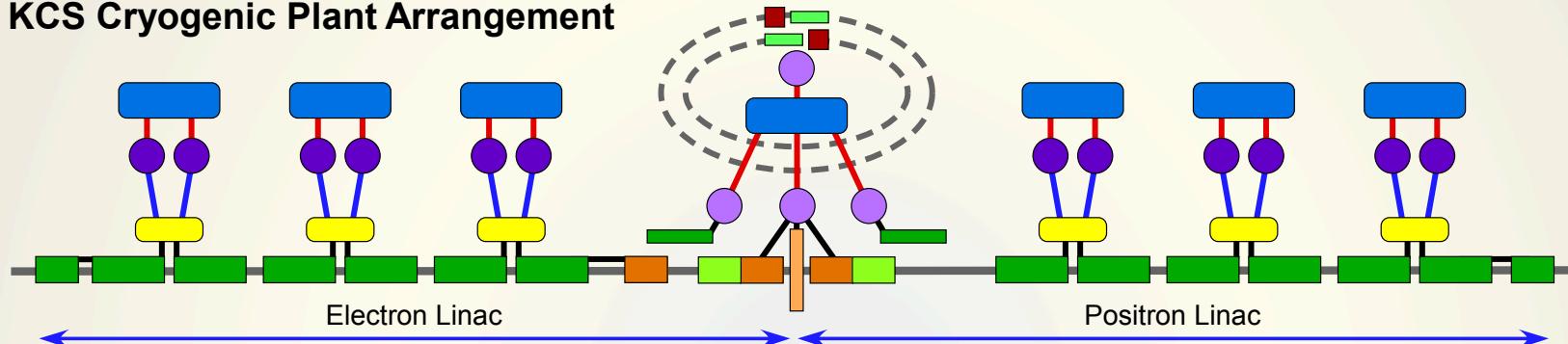
A

3

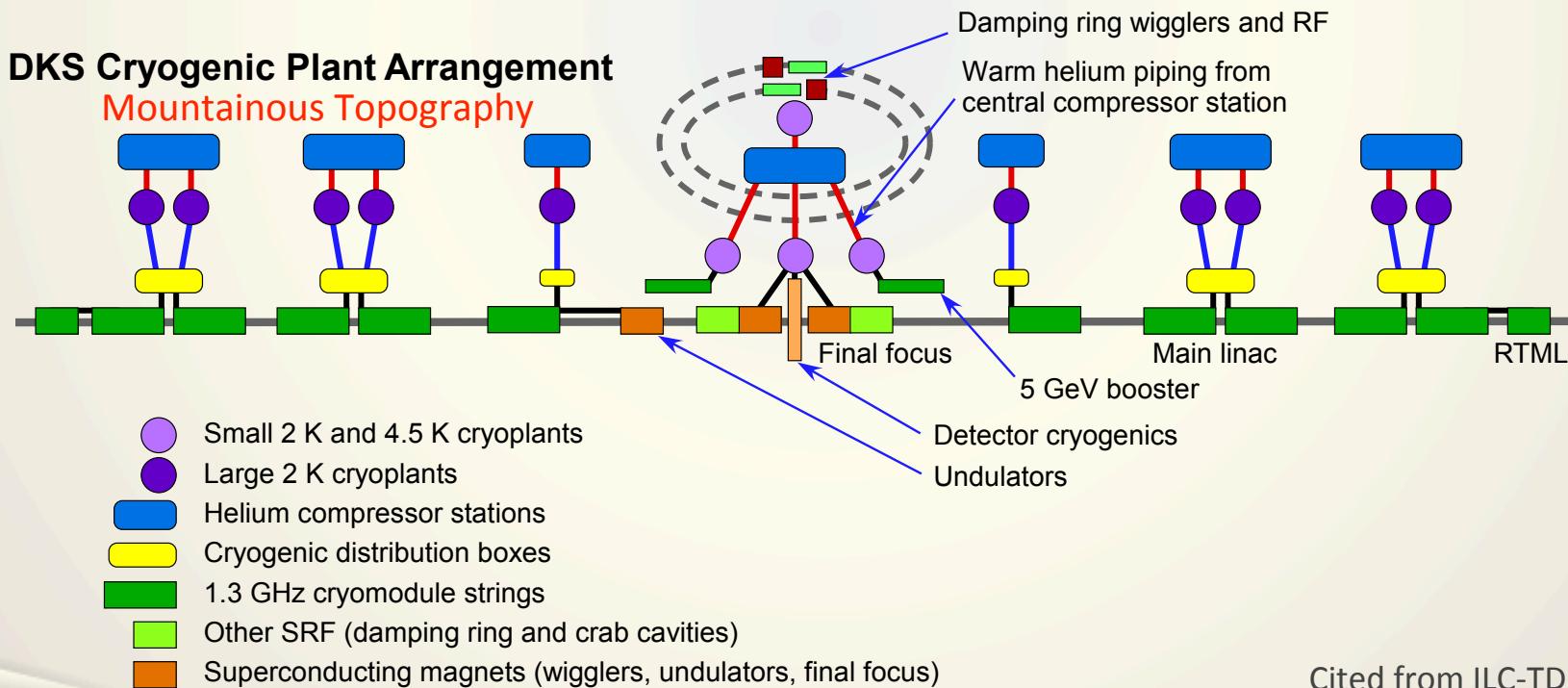


Cited from ILC-TDR

A KCS Cryogenic Plant Arrangement



DKS Cryogenic Plant Arrangement Mountainous Topography



Cited from ILC-TDR

二〇一四年七月一日

(火)

日直

仲井

主線形加速器の熱負荷と冷却システムの大きさ

		40–80 K	5–8 K	2 K
Predicted module static heat load	(W/module)	75.04	10.82	1.32
Predicted module dynamic heat load	(W/module)	58.80	5.05	9.79
Number of cryomodules per cryogenic unit		156 / 189	156 / 189	156 / 189
Non-module heat load per cryo unit	(kW)	0.7 / 1.1	0.14 / 0.22	0.14 / 0.22
Total predicted heat per cryogenic unit	(kW)	21.58 / 26.40	2.61 / 3.22	1.87 / 2.32
Efficiency (fraction Carnot)		0.28	0.24	0.22
Efficiency in Watts/Watt	(W/W)	16.45	197.94	702.98
Overall net cryogenic capacity multiplier		1.54	1.54	1.54
Heat load per cryogenic unit including multiplier	(kW)	33.23 / 40.65	4.03 / 4.96	2.88 / 3.57
Installed power	(kW)	547/669	797/981	2028 / 2511
Installed 4.5 K equiv	(kW)	2.50 / 3.05	3.64 / 4.48	9.26 / 11.47
Percent of total power at each level		0.16	0.24	0.60
Total operating power for one cryo unit based on predicted heat (MW)			2.63 / 3.24	
Total installed power for one cryo unit (MW)			3.37 / 4.16	
Total installed 4.5 K equivalent power for one cryo unit (kW)			15.40 / 19.01	

flat / mountain topographies

Cited from ILC-TDR

二〇一四年

七月一日

(火)

日直

仲井

ヘリウム液化冷凍機の構成



1. ヘリウムガスを圧縮機で圧縮($\sim 1.7 \text{ MPa}$)
2. 高圧ヘリウムガスを熱交換・断熱膨張
3. 4. 5Kの液体ヘリウムを生成
4. 液体ヘリウムを熱交換・断熱膨張
5. 2K超流動ヘリウムを生成
6. 2K超流動ヘリウムを超伝導加速空洞へ供給

A



4.5 K refrigerators
(18 kW @ 4.5 K)



1.8 K refrigeration units
(2.4 kW @ 1.8 K)



Cited from Ph. Lebrun, Magnet Technology for Fusion Training School, Cadarache, April, 2009

A



GHe storage



LIN storage

Vertical transfer line



3

Cryo-magnet string

Distribution line

Interconnection box



Cited from Ph. Lebrun, Magnet Technology for Fusion Training School, Cadarache, April, 2009

二〇一四年七月一日(火)日直仲井

LHCヘリウム冷却システムの機器一覧

Component	Dimensions	Quantity	Specification
4K Helium Liquefiers/ Refrigerators	20 m x 8 m	8	18 kW @ 4.5 K
Main Compressors	15 m x 12 m	8	1500 g/s
2K Superfluid Helium Refrigerators	10 m x 8 m	8	2.4 kW @ 1.8 K
Recovery Compressors	6 m x 6 m	n/a	None at LHC
Liquid Helium Storage Tanks	Φ3.5 m x 21 m	6	110000 L
Helium Gas Storage Tanks	30 m x 16 m	58	250 m ³
Liquid Nitrogen Storage Tanks	10 m x 5 m	13	50000 L
Cooling Towers	40 m x 22.5 m	8	SF1

二〇一四年七月一日

(火)
日直
仲井

ヘリウム液化冷凍機の製造

- ★ 全世界で2社しか製造していない
 - *Air Liquide* (フランス)
 - *Linde Kryotechnik* (ドイツ/スイス)
- ★ CERN-LHCの8台の冷凍機は上記2社が4台づつ受注・製造
- ★ 世界的には $25\text{kW}@4.5\text{K}$ までの製造実績がある

二〇一四年七月一日(火)

主線形加速器の液体ヘリウム使用量

Volumes	modules	Helium (liquid liters equivalent)	Tevatron Equiv.	LHC Equiv.
One module	1	346		
String (flat)	12	4153	0.07	
String (mountainous)	9	3115	0.05	
Cryogenic unit (flat)	156	54 000	0.9	0.054
Cryogenic unit (mountainous)	189	65 400	1.1	0.065
ILC Main Linacs	1825	632 000	10.5	0.63

Cited from ILC-TDR

日直
仲井

二〇一四年七月一日

(火) 直井

ヘリウム貯蔵の検討

液体ヘリウム必要貯蔵量 $\sim 650,000 \text{ L}$

1. ガスで貯蔵

標準的なガス貯蔵タンク 100 m^3 (直径 $3 \text{ m} \times$ 長さ 15 m)

液体ヘリウム $1 \text{ L} \rightarrow$ ヘリウムガス 0.7 Nm^3

$100 \text{ m}^3 \times 18$ (圧力比) $= 1800 \text{ Nm}^3 \rightarrow \sim 2,600 \text{ L/基}$

$\sim 100 \text{ m}^3/\text{基} \times 250 \text{ 基}$

2. 液体で貯蔵

液体ヘリウム容器 $\sim 50,000 \text{ L}$ (直径 $2.5 \text{ m} \times$ 長さ 10 m)

$\sim 50,000 \text{ L/台} \times 13 \text{ 台}$ または $\sim 65,000 \text{ L/台} \times 10 \text{ 台}$

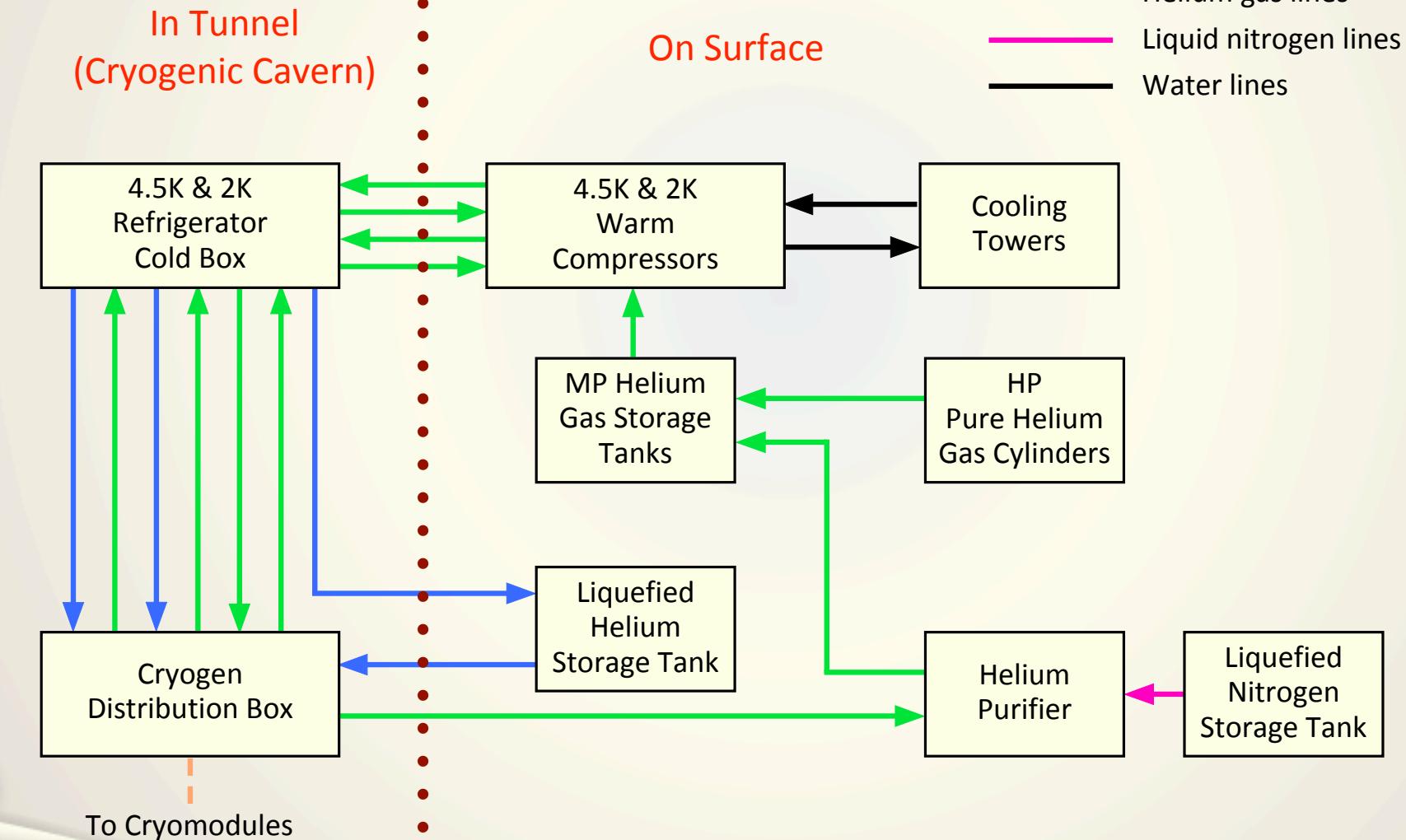
蒸発による液体損失量:

$50,000 \text{ L} \times 0.5 \%/\text{日} = 250 \text{ L/日} \rightarrow \sim 10.4 \text{ L/時間}$

$65,000 \text{ L} \times 0.5 \%/\text{日} = 325 \text{ L/日} \rightarrow \sim 13.5 \text{ L/時間}$

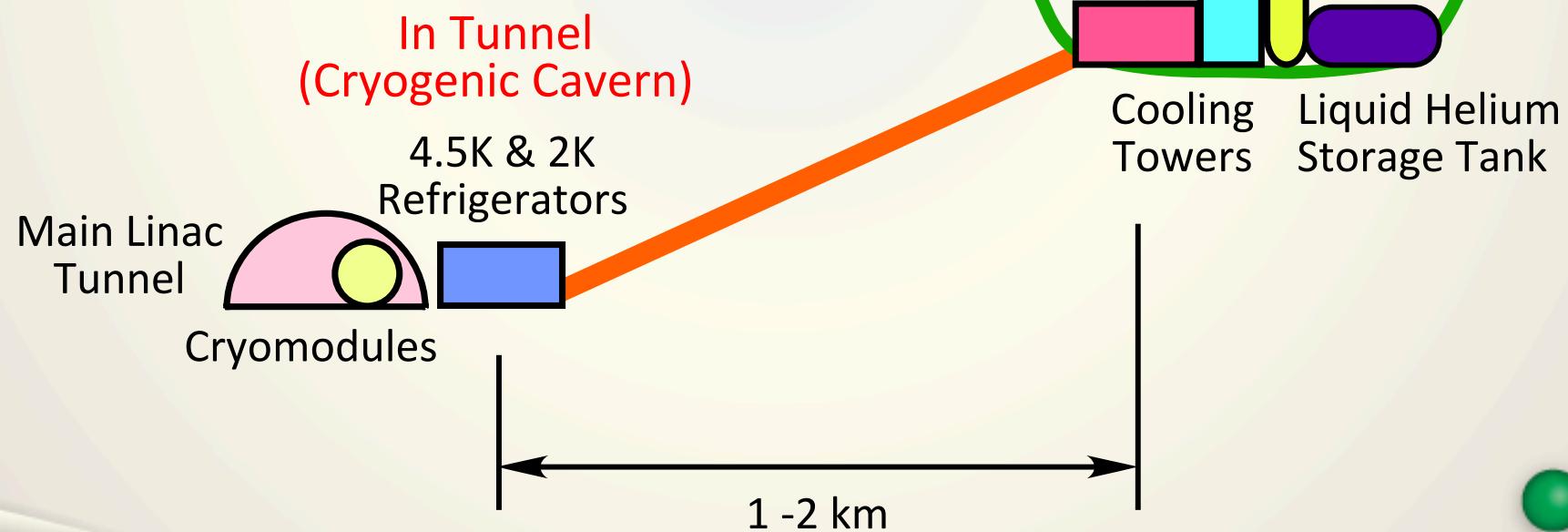
「子守り」として小型ヘリウム液化機を使用する

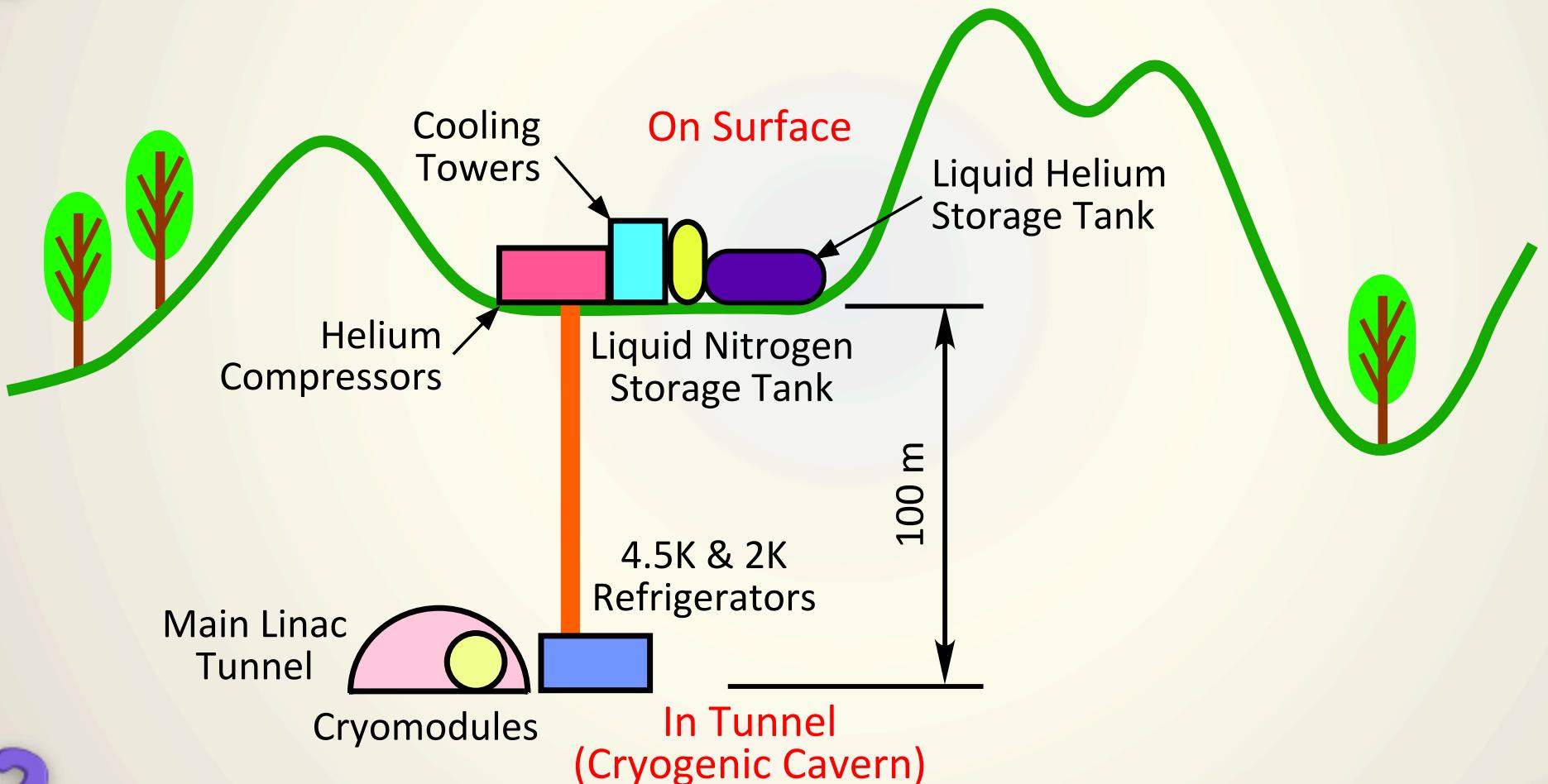
A



A

3



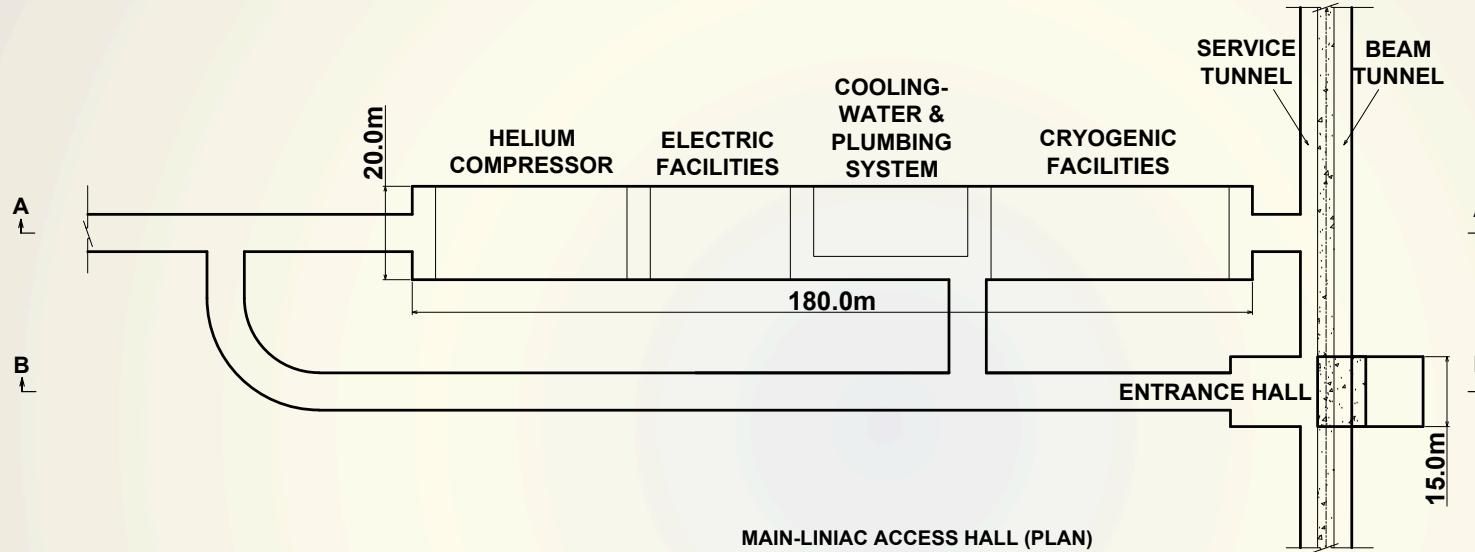


二〇一四年七月一日
(火)
日直
仲井

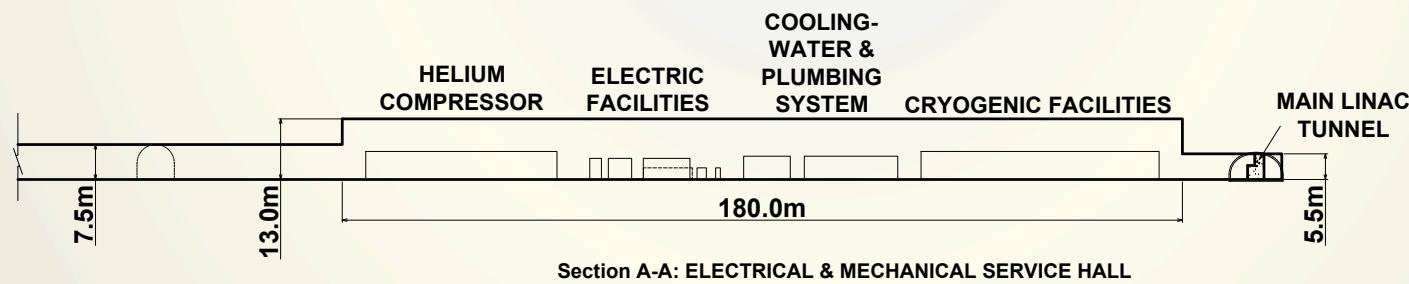
ILCヘリウム冷却システムの機器一覧

Component	Place	Dimensions	Quantity	Specification
4.5K & 2K Helium Refrigerators	Cavern		10	19 kW @ 4.5 K 2.3 kW @ 2 K
Distribution Boxes	Cavern			
Warm Compressors	Surface			
Cooling Towers	Surface			
Liquid Helium Storage Tanks	Surface		10	65000 L
Baby-Sitter Refrigerators	Surface		10	20 L/h
Helium Purifiers	Surface			
Helium Gas Storage Tanks	Surface		10	250 m ³
Liquid Nitrogen Storage Tanks	Surface			50000 L

A



3

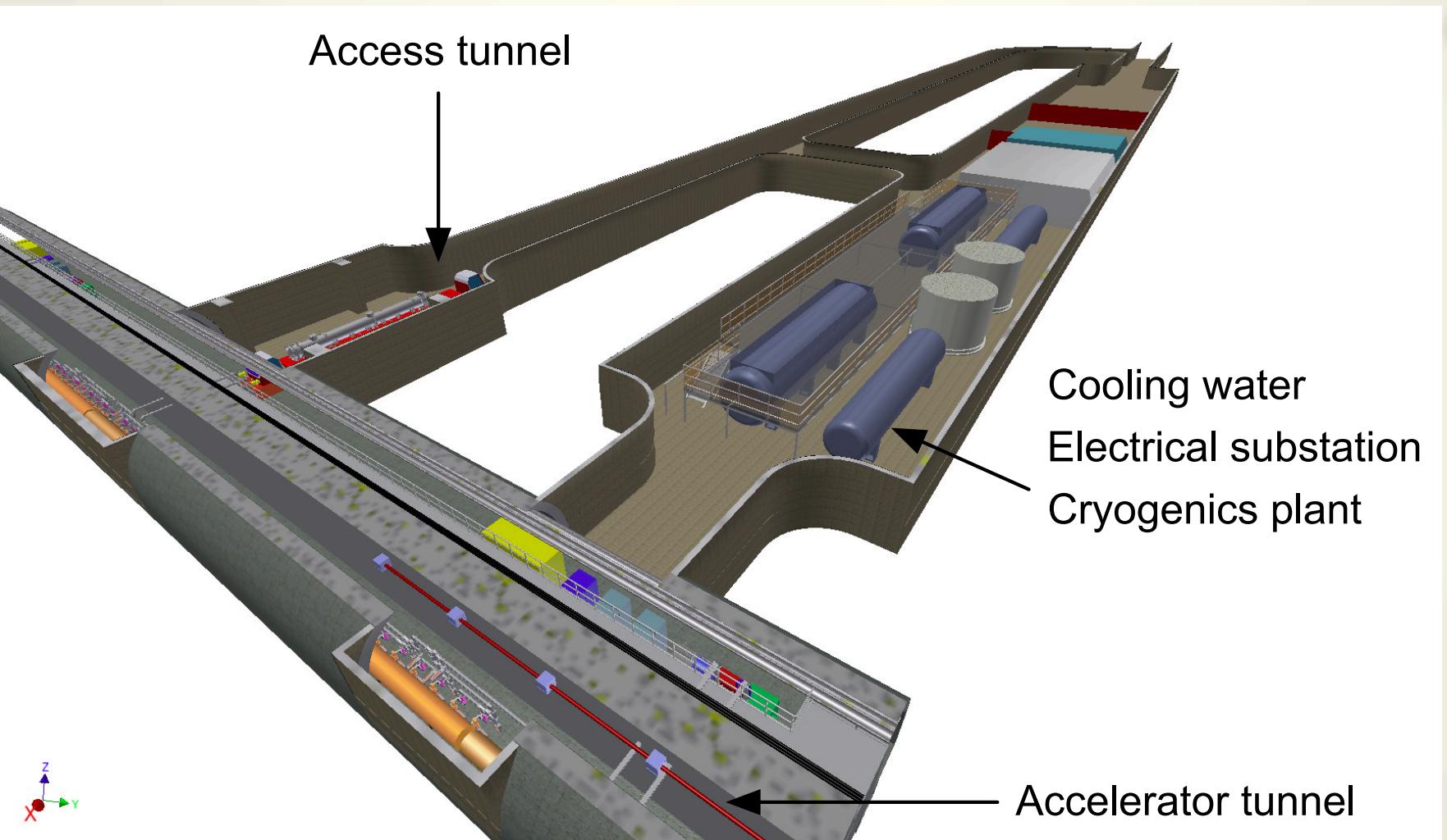


27

Cited from ILC-TDR

仲
井ILCのCryogenic Cavernの大きさ

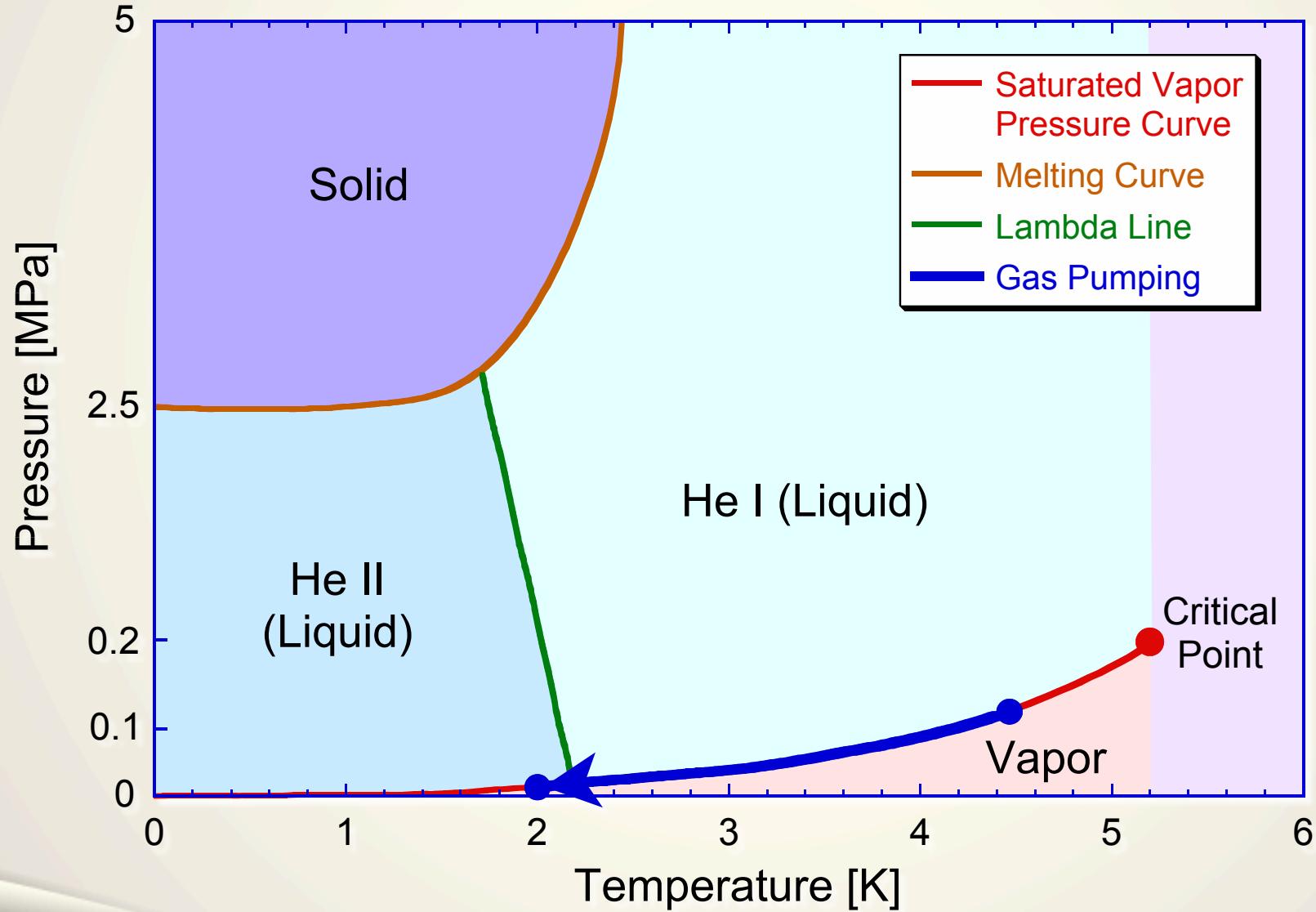
A



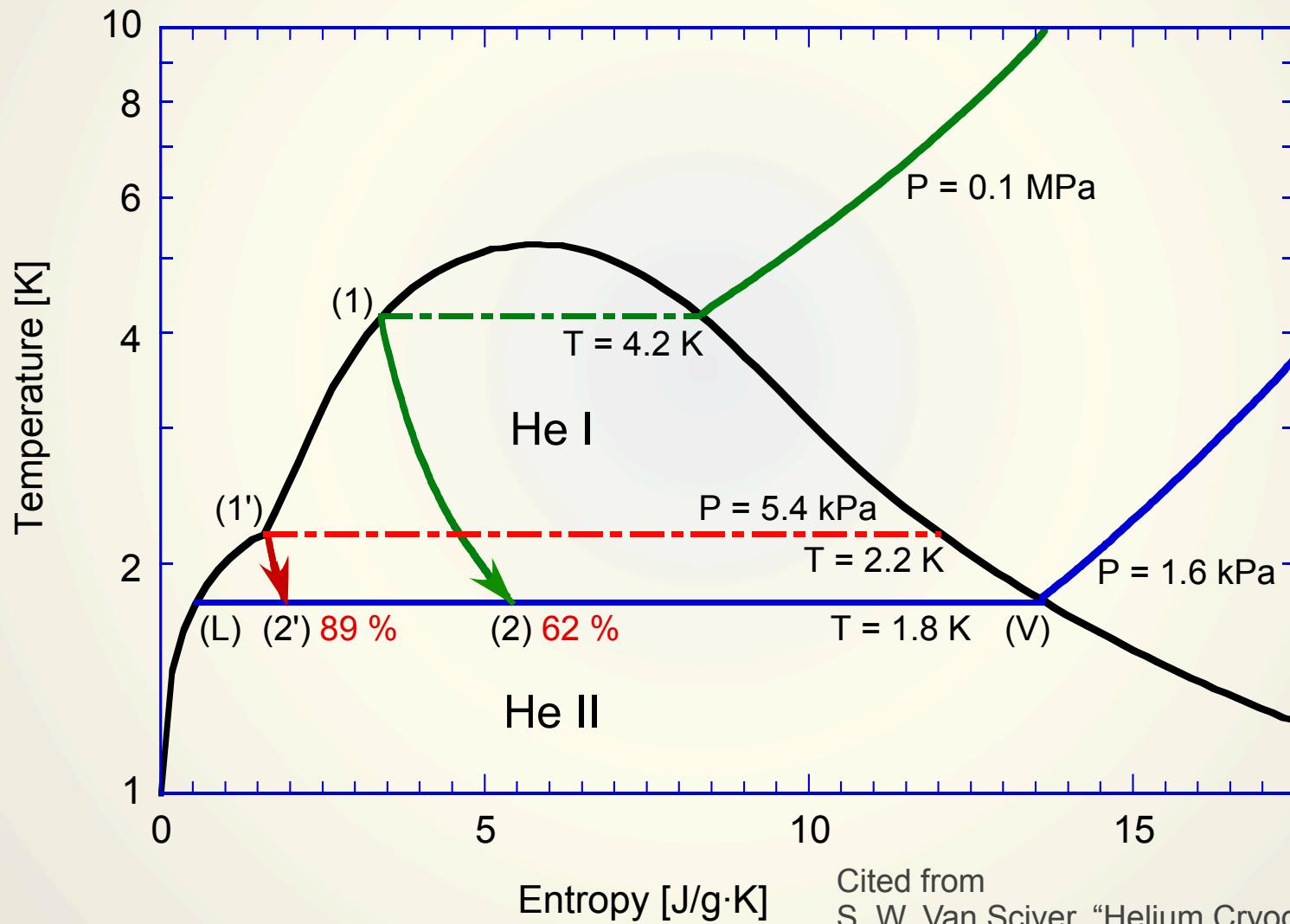
Cited from ILC-TDR

仲
井

ILCのCryogenic Cavern概要

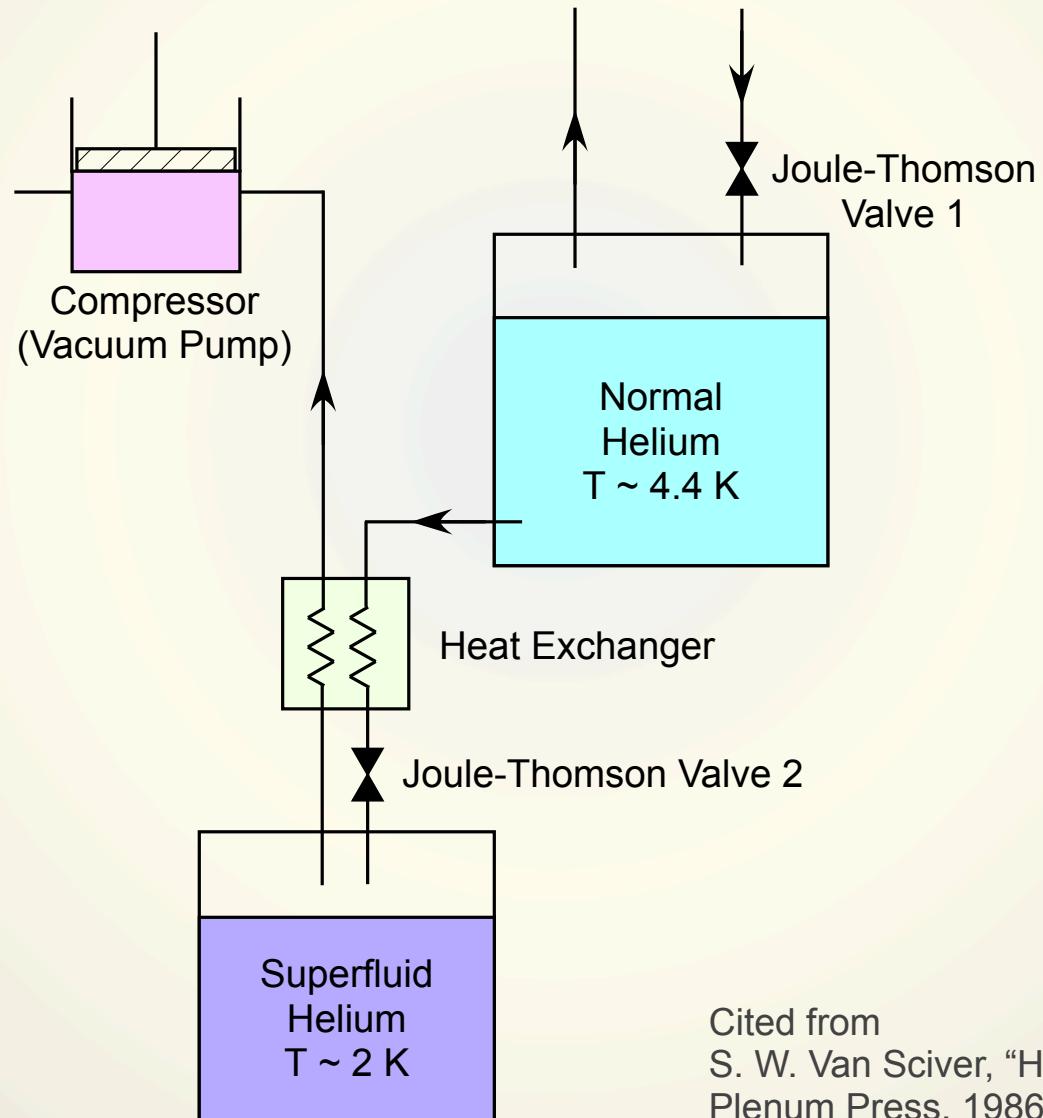


ヘリウムの相図（状態図）



Cited from
S. W. Van Sciver, "Helium Cryogenics,"
Plenum Press, 1986

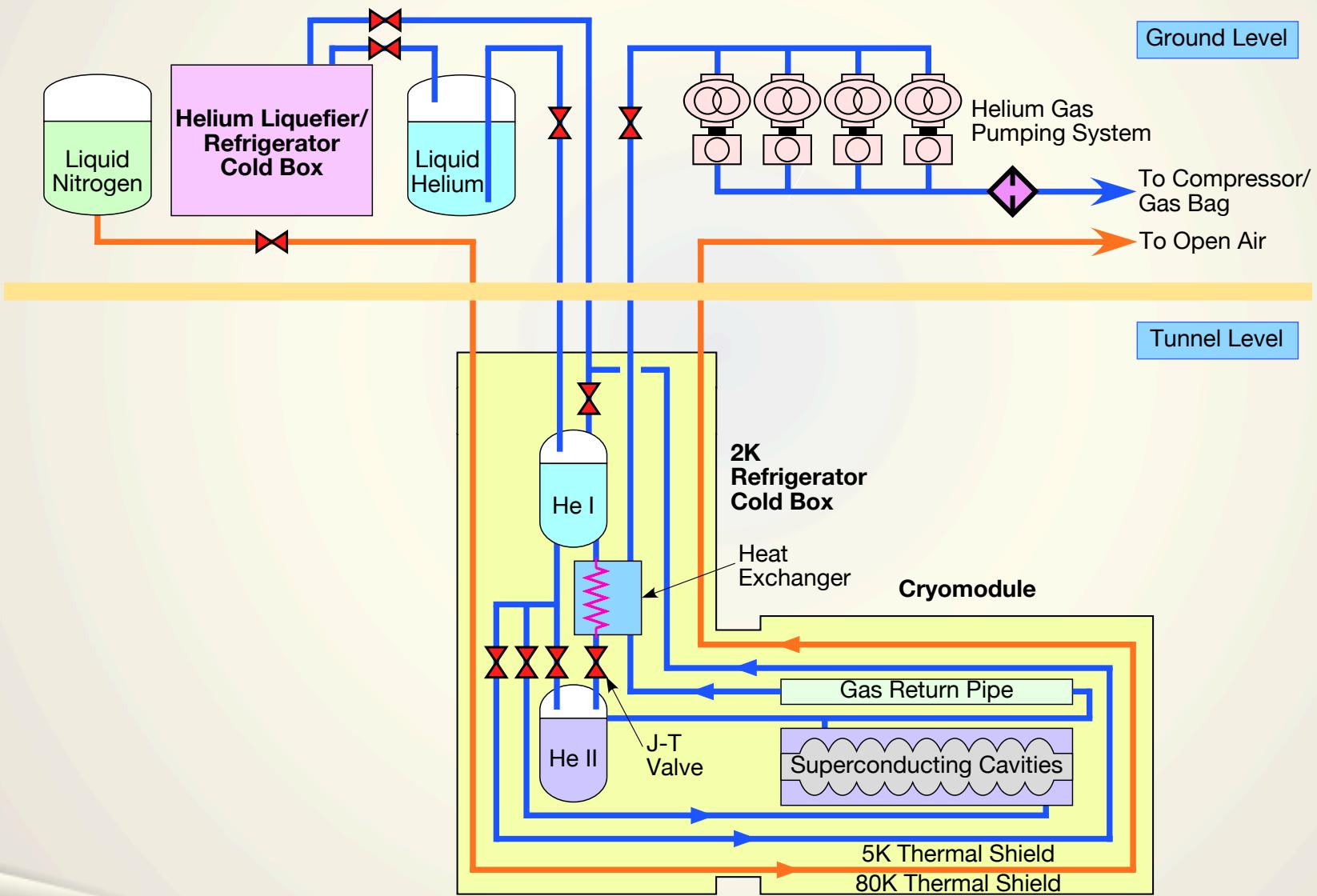
J-T弁入口温度と液生成率



Cited from
S. W. Van Sciver, "Helium Cryogenics,"
Plenum Press, 1986

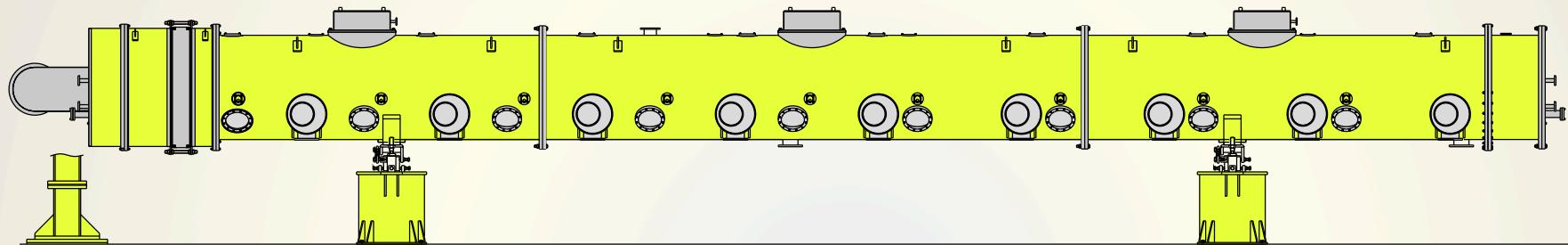
A

3



STF棟ヘリウム冷却システムの概念

A



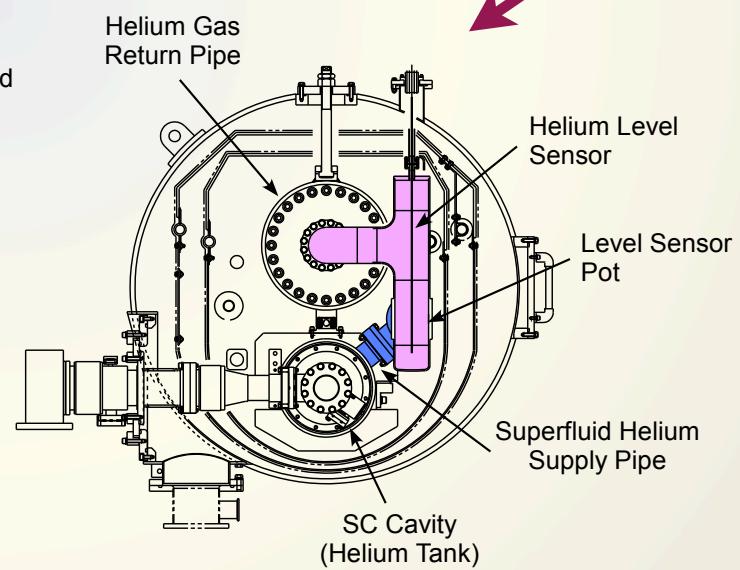
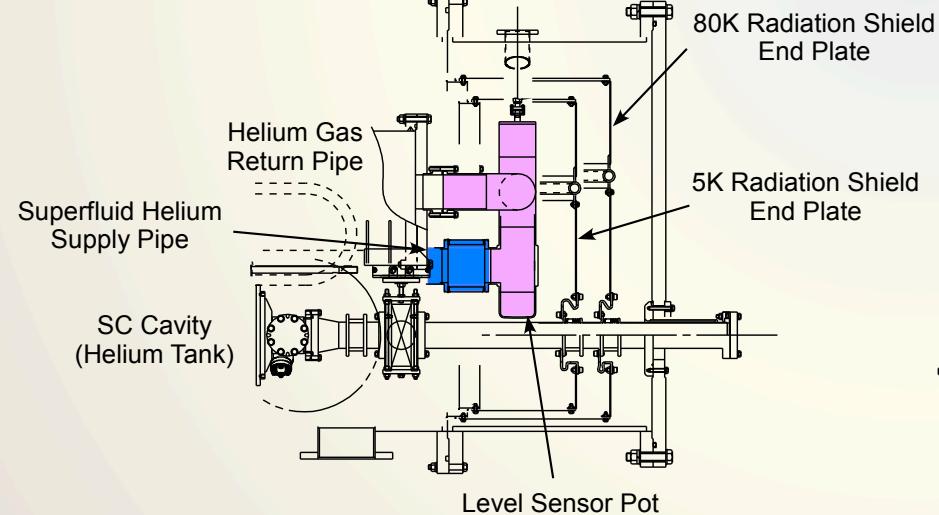
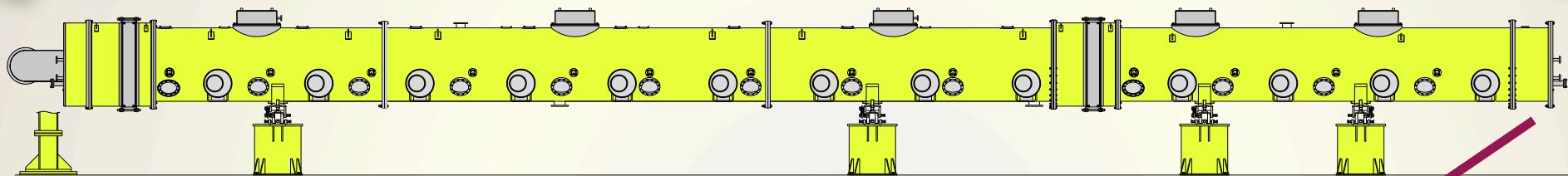
3



2

STF CM-1 クライオモジュール

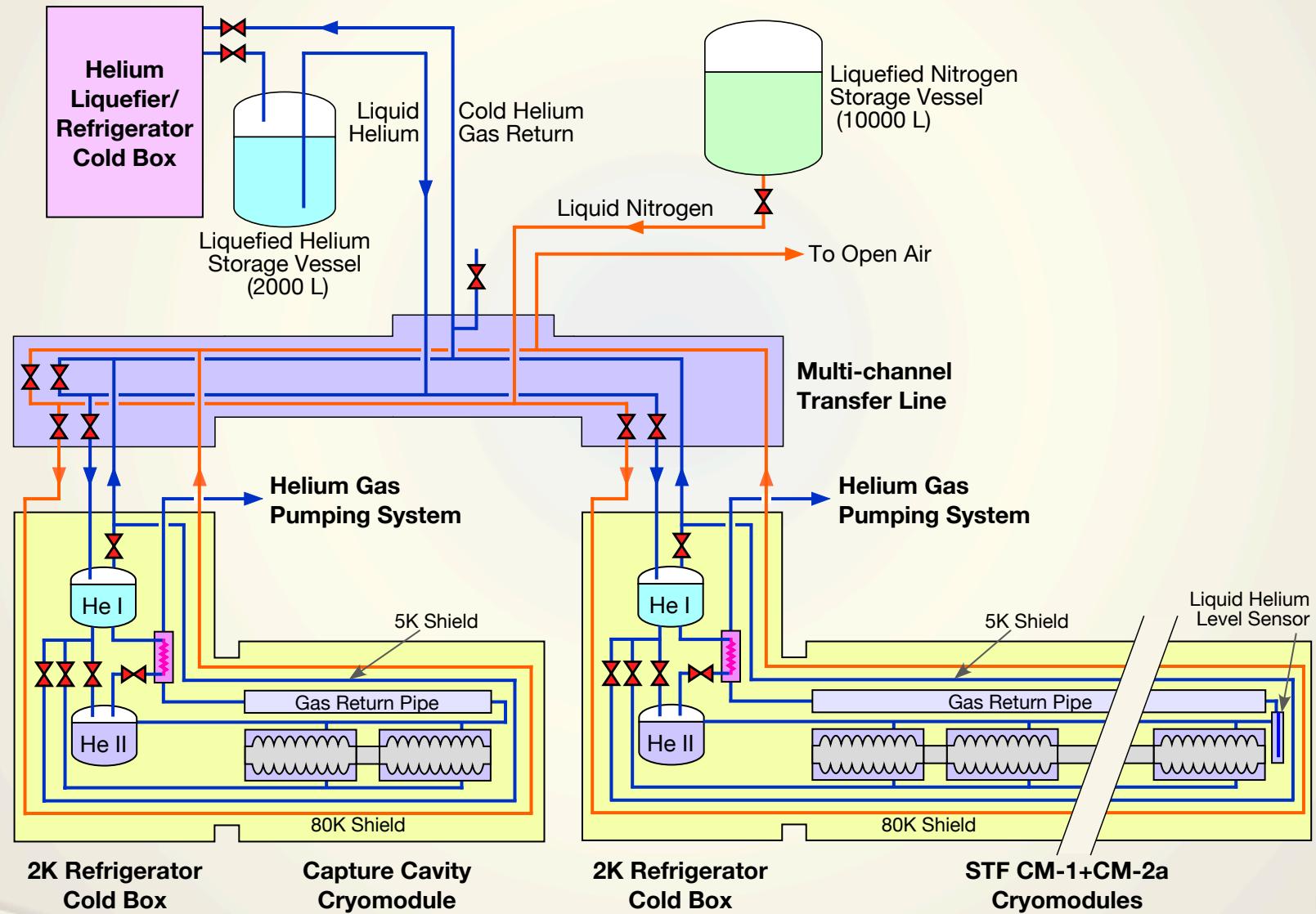
A



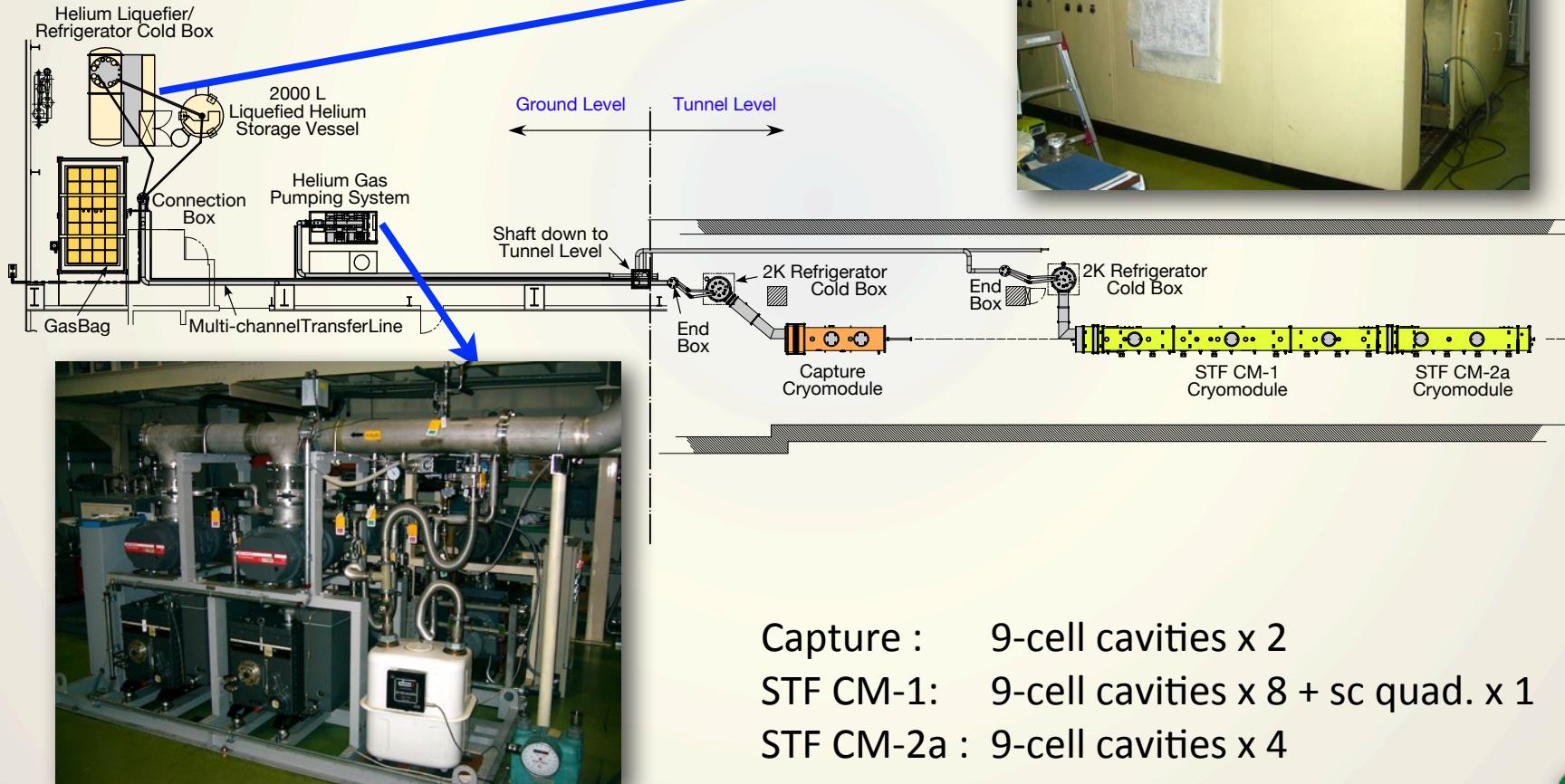
Downstream Side View

A

3



A



Capture : 9-cell cavities x 2

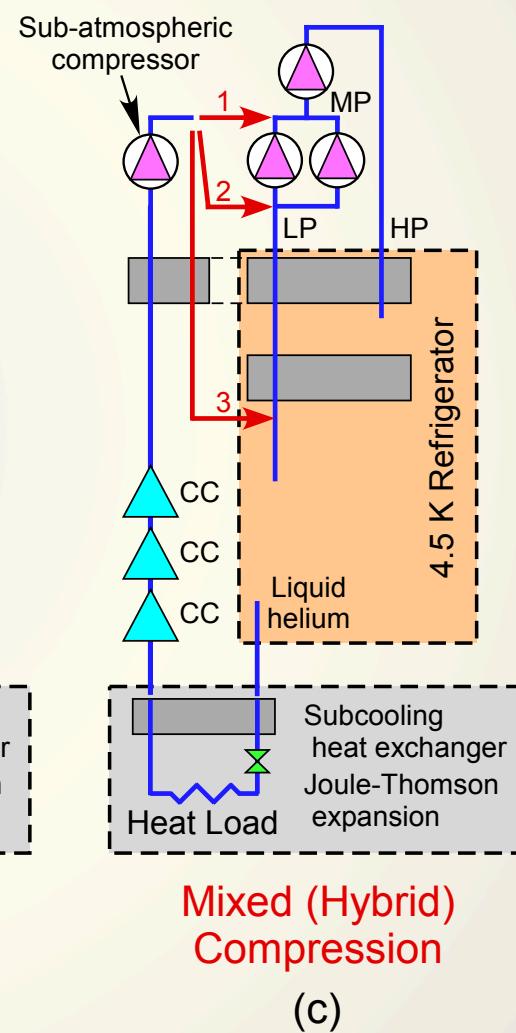
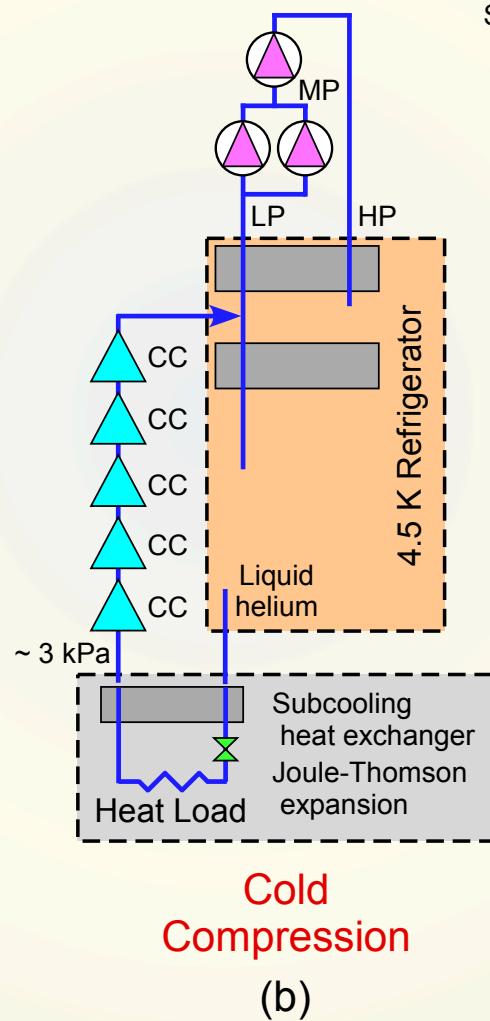
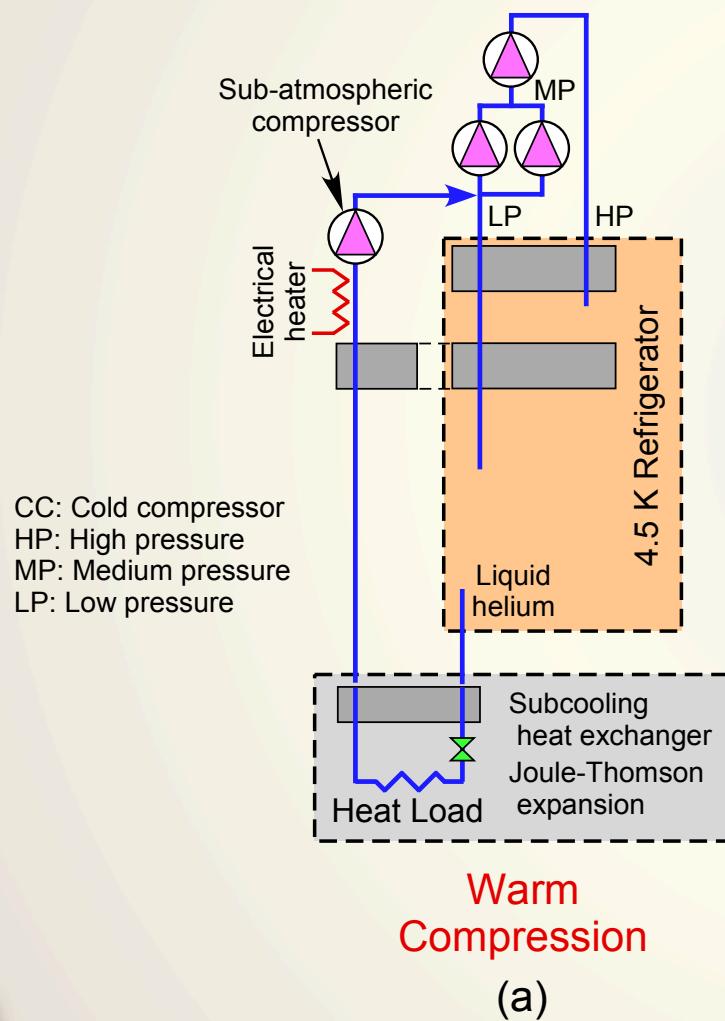
STF CM-1: 9-cell cavities x 8 + sc quad. x 1

STF CM-2a : 9-cell cavities x 4

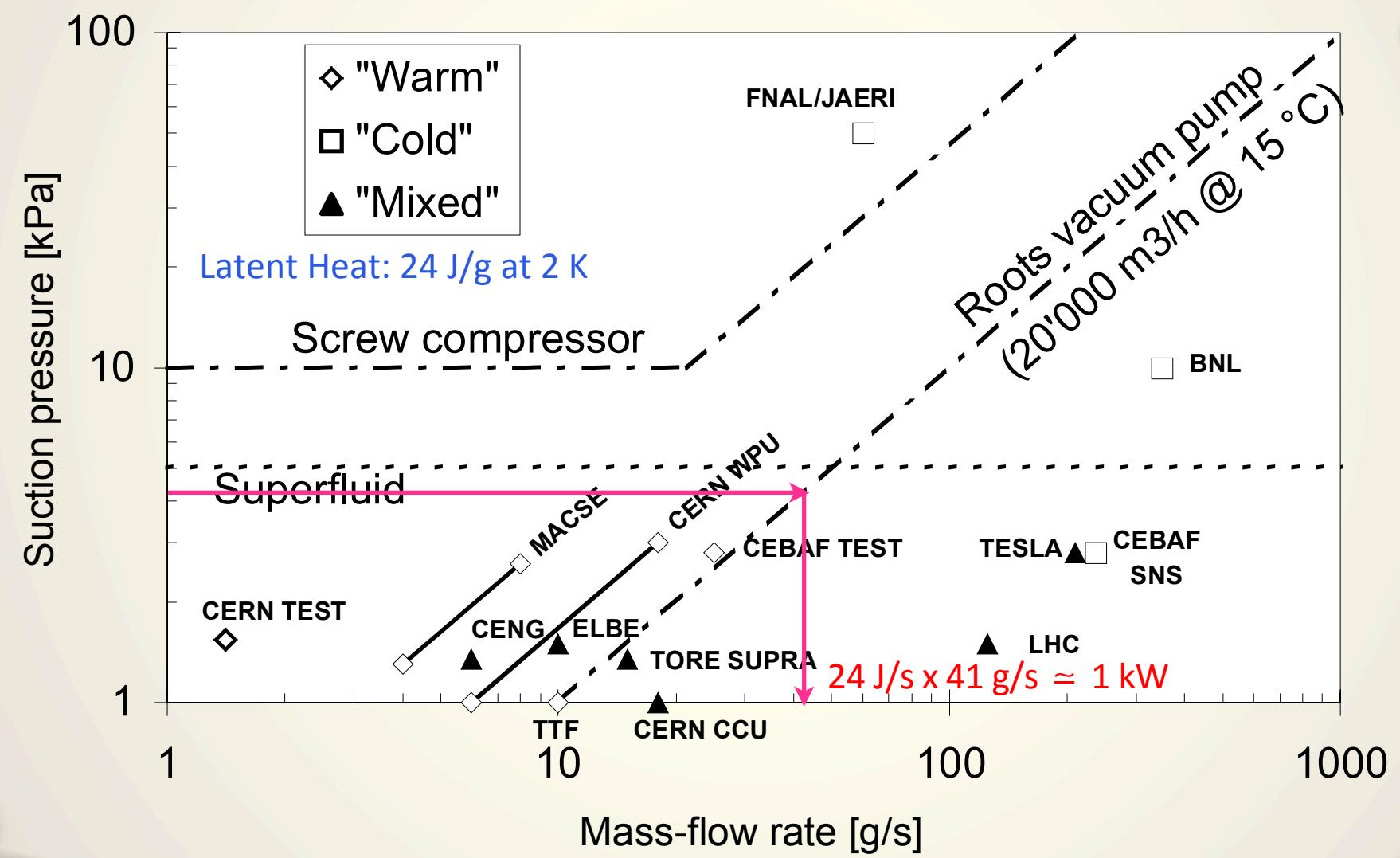
仲井

STF棟ヘリウム冷却システムの概要

A



Cited from Ph. Lebrun and L. Tavian, European Graduate Course in Cryogenics Helium Week, 2010



Cited from Ph. Lebrun and L. Tavian

ヘリウム圧縮機の使用範囲

A

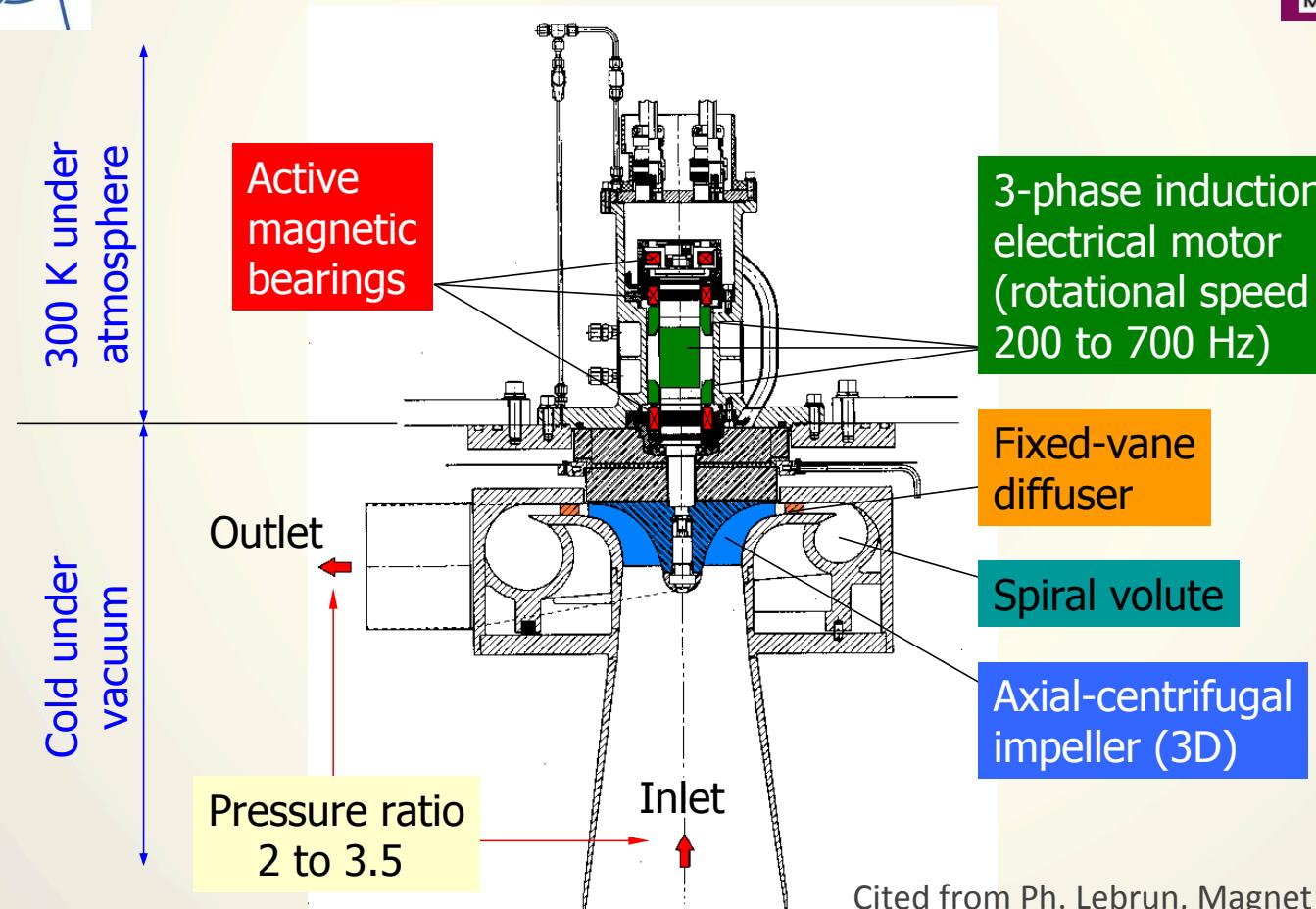


7

Main Features of LHC Cold Compressors



3



Cited from Ph. Lebrun, Magnet Technology for Fusion Training School, Cadarache, April, 2009

A



7

Cold hydrodynamic compressors for the LHC

3



IHI-Linde



Air Liquide



2

Cited from Ph. Lebrun, Magnet Technology for Fusion Training School, Cadarache, April, 2009

仲
井

LHCの低温圧縮機

二〇一四年七月一日

(火)
日直
仲井

KEKでの状況

- ★ STF棟とERL開発棟での2Kヘリウム冷却システムの設置と運転
 - 真空ポンプを採用した2K冷却システム
 - 低温圧縮機は使用していない
- ★ 冷却能力の増強と高効率化・最適化
- ★ 低温圧縮機の検討

二〇一四年七月一日

(火)

日直

仲井

ILCヘリウム冷却システムの現状

- ★ おおまかかな技術仕様のみ検討済み
- ★ 詳細な設計はまだ行われていない
- ★ クライオモジュールの冷却方法はほぼ決定
- ★ 低温圧縮機の製造・運転実績はある
- ★ 担当者は現時点で取り敢えず世界で3名
(CERN, FNAL, KEK)
- ★ 施設の設計のために、ヘリウム冷却システムの構成機器の大きさと配置を検討中

二〇一四年七月一日

(火)
日直
仲井

今後の課題

★ ILCクライオジエニクスでの課題

- 詳細設計・仕様(フロー図, 機器一覧)が未定

★ KEKでの課題

- 既存ヘリウム液化冷凍機の老朽化
- 大型2Kヘリウム冷却システムの実績なし
- 職員の高齢化・少數化
- 既存進行中のプロジェクトとの共存

二〇一四年七月一日

(火)
日直
仲井

まとめ

1. ILCの技術設計報告書(TDR)に沿ったヘリウム冷却システムの検討が始まった
2. TDRには詳細な設計までは記載されていないため、CERNのLHCのヘリウム冷却システムを参考にする
3. KEKでは2Kヘリウム冷却システムを構築し、運転経験を蓄積している
4. ILCでは低温圧縮機を採用する予定であるため、低温圧縮機の検討が必要
5. 人と予算の不足は他のグループと共通