

った場合の状況（赤の楕円）を表す。緑の領域は最小超対称性理論（MSSM）の場合の許される領域、赤の細い線に見える領域は標準理論（SM）とMSSMが重なる領域である。この例では、標準理論も最小超対称性理論も排除されることになる。中心値が動いて緑の領域に入ってくれば、MSSMの理論パラメータに関する情報が得られる。

(2) 技術的困難やトラブルの可能性に関する考察

建設や製作上での技術的困難が生じることは、これまでの加速器でも経験されている。すべてを網羅的に事前に予測するのは困難で、想定外の問題についてはその都度検討を進めて工期の短縮とコストの削減を図ることになる。その際に重要なのは過去の経験・蓄積であり、ILCでの15年の開発研究とEuro-XFELやLCLS-IIでの経験や規模が同程度のLHCの経験も大いに助けになると考えている。

「すべてを網羅的に予測せよ」などという無茶なことを言うつもりはありません。TDRのシナリオの中で達成に困難が伴う箇所は、推進者が一番よく知っているはずであるし知っていないければならないと思います。その検討状況を知りたいのです。

ILC-TDRは、建設地などの基本条件が決まっていない段階、そして、実現に向けた準備期間に入る前の段階で、国際協力によって、技術的に建設可能であることを示す為にまとめられている。実現に向けた政府の方針が示された後、TDR後の4~5年間に準備期間に予算を伴って詰められるべき課題も明記されている。この点については、過去の国際的な技術レビューやコストレビューでも議論が重ねられており、これまでビームダンプ、陽電子源、SRF工業化準備などが課題として挙げられている。

ビームダンプ：これまでビームダンプの設計が進み、ビーム窓の厚みや冷却水の条件などについて250GeV ILCにあわせてシミュレーションで最適化を行っている。準備期間には、ビーム窓の設計試作、加圧試験やビーム窓の遠隔操作による作業設計などを進める予定である。

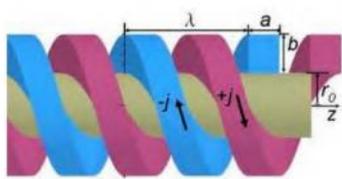
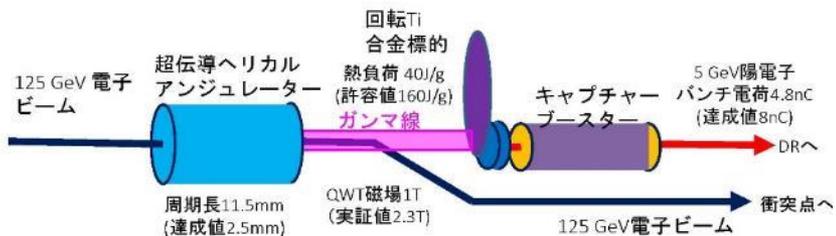
陽電子源：ベースラインとしてアンジュレター型をバックアップとして電子駆動型を検討してきた。両者で共通の要素である回転ターゲットについて研究開発を行っているが、準備期間では回転ターゲットのプロトタイプ作成と陽電子源直後の磁場による収束系の開発を進めるとともに、準備期間の2年目までにはどちらの方式を探るか技術選択を行う。

SRF工業化準備：現在はコスト削減のための研究開発を進めており、来年度までに効果を見定める。そのうえで、準備期間には空洞などの量産技術の確立、ハブラボ機能の整備などを進める。（9/13の資料1、P.86~94）

(3) 緊急時の対応について

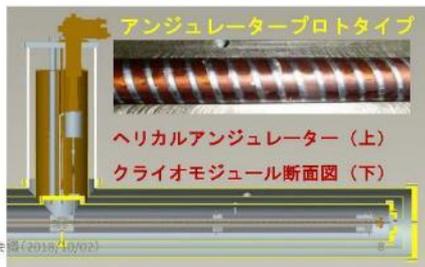
地震については、9/13分科会資料IP.2に記載した通りであるが、緊急地震速報を用いた時

### 陽電子の発生(アンジュレーター方式)

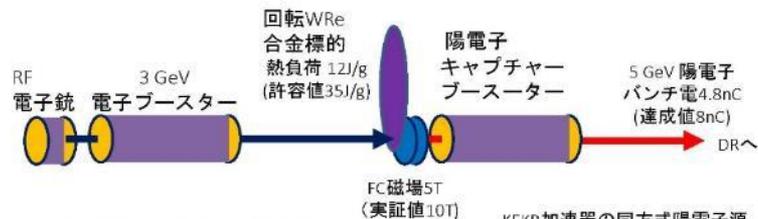


シンクロトロン放射により円偏光ガンマ線を生成

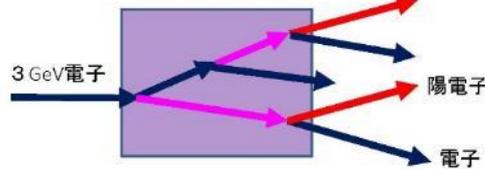
日本学術会議(2018/10/02)



### 陽電子の発生(電子ドライブ方式)



制動輻射によるガンマ線生成  
+  
電子・陽電子対生成



日本学術会議(2018/10/02)



KEKB加速器の同方式陽電子源のカットモデル。

### 実証されたILCのパラメーター

パラメーター	要求仕様	設計仕様	達成値	単位	実証場所など
<b>陽電子ビーム</b>					
バンチ電荷	3.2	4.8	8.0	nC	SLAC SLC (E-Driven)
アンジュレーター周期	11.5	11.5	2.5	mm	SLAC E166
陽電子偏極度(オプション)	30	30	80	%	SLAC E166
W-Re標的熱負荷(PEDD for E-Driven)	12	18	35	J/g	SLAC SLC (E-Driven)
Ti 合金標的熱負荷(PEDD for Undulator)	40	61	160	J/g	Estimated from physics constant table
Flux Concentrator ピーク磁場 (E-Driven)	5.0	5.0	10	T	BINP
QWT ピーク磁場 [Undulator]	1.0	1.0	2.3	T	KEK

# Water beam dump以外の検討 ビームダンプ9

## ビーム吸収体

- 固体(周囲を水冷)

鉄、アルミ、銅

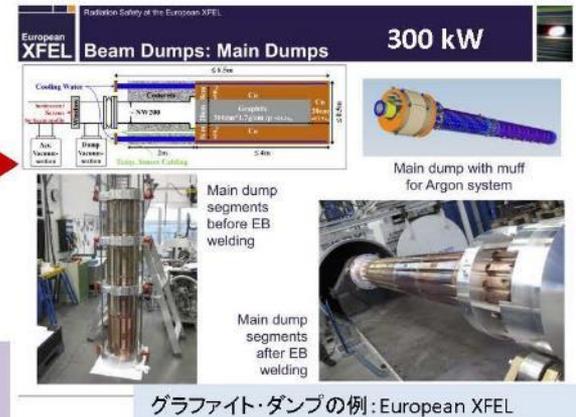
グラファイト

1200°Cに耐えるが交換が必要

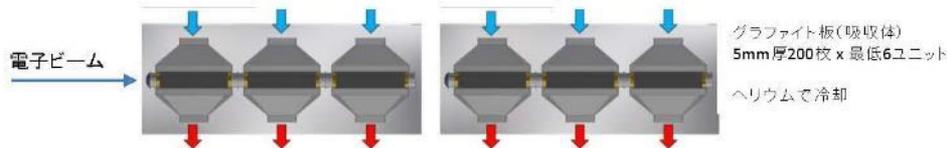
- 気体

ビームを止める長さ: 数kmが必要。信頼性確保に難。

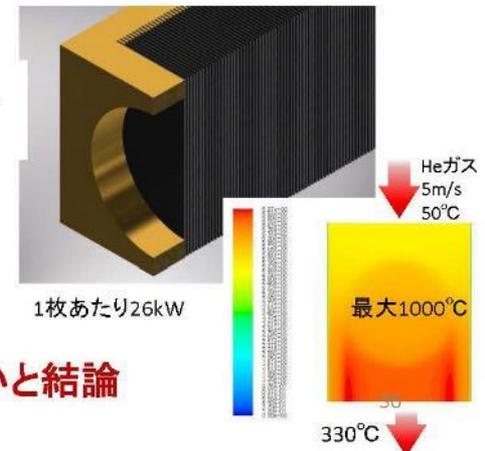
- ILC (TDR) 17MW用代替案の検討を2016-17年に実施  
(KEK+CERN(LHCビームダンプ)の協力)



- ビームがあたる場所を直接冷却する必要。← 固体の融点、耐力力
  - 吸収体をビーム進行方向に分割(熱・応力の分散)
  - 水で囲んで冷却するのでは、ビームが通過するのでwater dumpと変わらない。
  - ガスで冷却する場合を評価



グラファイト板(吸収体)  
5mm厚200枚 x 最低6ユニット  
ヘリウムで冷却



- 比較的規模の大きい高圧ガスシステム、熱交換効率の問題
- グラファイトおよび周辺構造の放射化が厳しい。ダンプ自体の交換も。
- ビーム運転中のグラファイト劣化対策、検出方法が課題
- 放射化した高圧ガスの漏れ事故対応が困難 → 現実的では無いと結論

日本学術会議 2018/9/13

ビームダンプの評価のために  
想定するビームパラメーター

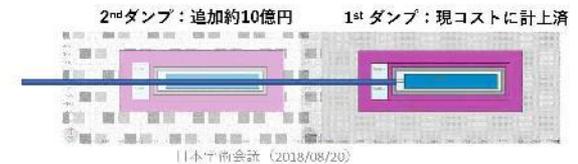
	TDR		ILC
		TDR当時、将来の 可能性を踏まえた 最大値として1000	
衝突エネルギー (GeV)	500		250
ビームエネルギー(GeV)	250	500	125
繰返し (Hz)	5	4	5
パルス内バンチ数	1312	2450	1312
バンチ間隔 (nsec)	554	366	554
パルス長 (msec)	0.727	0.897	0.727
バンチあたり粒子数	2x10 <sup>10</sup> (3.2nC)	1.74x10 <sup>10</sup> (2.79nC)	2x10 <sup>10</sup> (3.2nC)
パルス当り電荷 (μC)	4.20	6.83	4.20
パルス内電流 (mA)	5.78	7.61	5.78
パルスエネルギー (MJ)	1.05	3.41	0.53
平均電力 (MW)	5.25	13.7	2.63

ビームダンプ設計：20%のマーヅン → **17 MW**

2

ビームダンプの冗長化 (案)

- 不慮の故障に対応
  - 「放射化による復旧作業の制限=数年の停止」を回避
- 経験を積んで高度化する
  - 信頼性の向上、17MW(1TeV)等への技術確認
- ダンプラインに直列配置
  - e<sup>-</sup>e<sup>-</sup>ビーム衝突で生じるBeamstrahlung光子 (直進)をビームダンプで受けるため。
  - 2<sup>nd</sup>ダンプは1<sup>st</sup>の直前に後から設置する。床工事等はあらかじめ必要。冷却水施設は共用 (再利用) 可能。



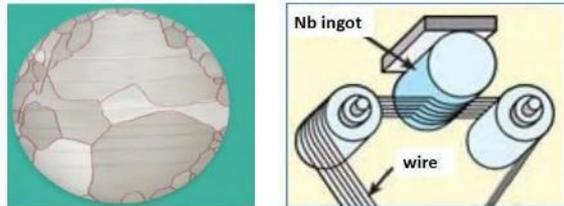
14

# 日米ILC コスト削減R&D 技術革新によるコスト削減

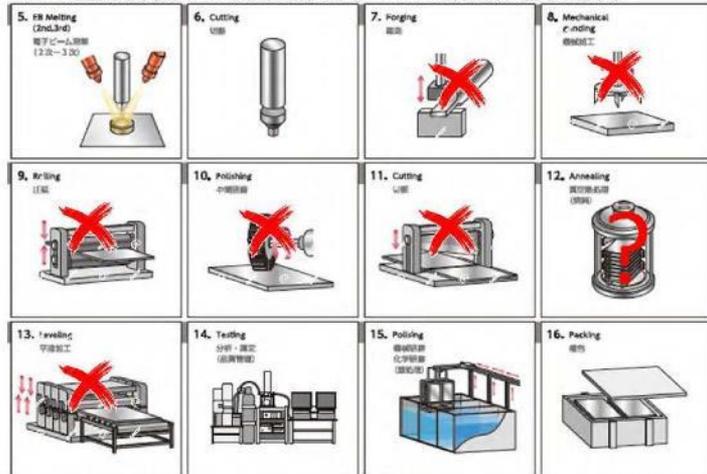
日米ディスカッショングループ(米国エネルギー省-文科省)において米国フェルミ研究所、KEKの提案について着手することを合意。2019年度までR&Dを行う予定。

超伝導ニオブ材料の低価格化: 材料コスト削減  
-ダイレクトスライス材料

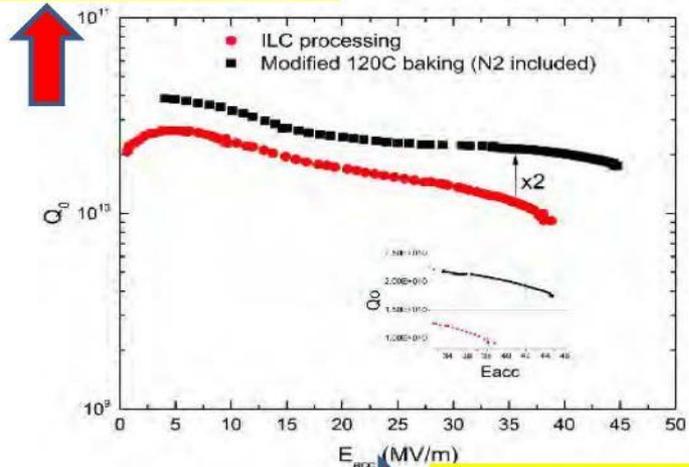
フェルミ研究所で開発された新技術による空洞の効率化: 使用空洞数削減  
-窒素インフュージョン



空洞に使用するニオブ材料の製造過程を工夫することで空洞材料の低価格化(~50%削減)を目指す



高いエネルギー効率



高い加速性能

フェルミ研究所のデータ  
空洞電界が10%程度増加 (空洞数の10%削減)  
空洞の高周波損失が1/2に向上

組織・体制、人材及びその育成プラン策定のベースとなる KEK-ILC アクションプラン（2016年1月）を策定し、同プランに基づき、本準備期間<sup>9</sup>（4年程度）に本格的な精査、技術実証を進めることとされており、そのために必要となる準備経費（一部国際協力を含む）は233億円と見積もられている。

また、以下に示す加速器の技術、トンネル建設、地震対策などに関する諸課題は、準備期間中の実証や実地でのトンネル建設等が開始されてから、その状況を踏まえて改めて仕様等を見直し、最適化を図る必要があるものも多い。それによる当初の費用の見積りからの増加を抑えるため、これまで研究者コミュニティにおいては様々な検討がなされ、また本作業部会においても議論が深められてきたところであるが、その性格上事前に具体的に算定することは難しい。そのため、以下においてはそれらにより見込まれる費用を基本的に明示せず記述しているが、状況によっては大きな費用の増加につながる可能性も否定できないことに留意が必要である。

（1）前回報告で指摘した課題への対応状況及び追加の指摘事項

前回報告で指摘した課題のうち、幾つかの課題では検討が進捗しているもの、多くの課題については、引き続き本準備期間に本格的な検討を行うとされている。今回の本作業部会で聴取した主な対応状況及びそれらに関連する新たな指摘事項は以下のとおり。

①コスト面でのリスクに関する課題

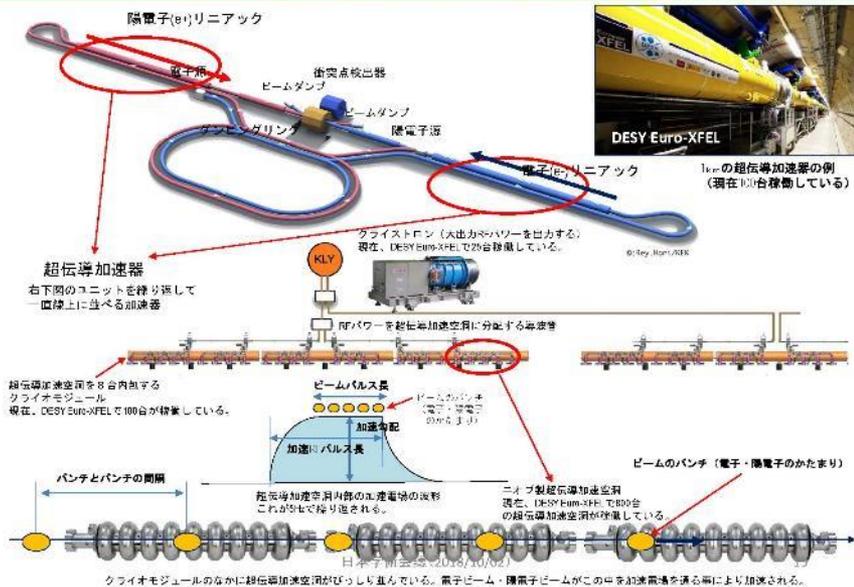
- 超伝導加速空洞のコスト削減に向けて、日米共同研究により「低コスト・ニオブ材料の活用による超伝導高周波空洞材料の低価格化」<sup>10</sup>及び「低損失・高電界実現のための超伝導高周波空洞の表面処理」<sup>11</sup>のコスト削減 R&Dを進めている。
- 前回報告で指摘した大量の高純度・高品位のニオブの必要性については、今回の見直しで加速空洞が1万8,000台から9,000台に変更されたことに加え、コスト削減 R&Dによりニオブ材料をインゴットから直接スライスする工法を検討しており、これにより生産効率が向上した場合には、ILCで必要とする品質及び調達規模に見通しが得られる可能性が高まる。
- 前回報告で指摘した見積りから漏れている項目のリストアップについては、「2.

<sup>9</sup> KEK-ILC アクションプランでは「予備準備期間」、「本準備期間」、「本建設期間」の3つの段階を想定しており、「本準備期間」は ILC 準備のための相当額の予算が措置されて進める準備期間とされている。

<sup>10</sup> 超伝導加速空洞のニオブ材料精錬過程における純度及び残留抵抗比を最適化することにより、精錬コストを低減させる。また、インゴットから空洞用ディスク材を直接スライスして、従来の鍛造、圧延、機械研磨工程を省くことにより、コスト削減に資する。これにより250GeV ILCでは1~2%の削減効果が期待できる。

<sup>11</sup> 米国フェルミ国立加速器研究所で開発された手法。超伝導加速空洞を熱処理する工程で一定圧力の窒素を導入し、加速勾配を向上させ、低損失を実現することで、空洞等の台数削減や空洞を冷却する冷凍機コストの削減に資する。これにより250GeV ILCでは2~5%の削減効果が期待できる。

### 超伝導加速器 ビームを加速する



### 実証されたILCのパラメータ

超伝導加速器	TDR仕様値	達成値	備考
クライオモジュール内加速空洞の平均加速勾配	31.5 MV/m	32.5MV/m (PXFEL-1, DESY) 31.5MV/m (CM-2, ASTA) <b>31 MV/m</b> (CM-1&2a, STF)	DESY-Proto-XFEL (ILC-TDR V3, Part-1, p43) FNAL-ASTA (E. Harms, AWLC14 May 2014) STF (Y. Yamamoto, 加速器学会, 2016)
クライオモジュール内加速空洞の平均Q <sub>0</sub> 値	10 <sup>10</sup>	-- (PXFEL-1, DESY) <b>0.9×10<sup>10</sup></b> (CM-2, ASTA) <b>0.7×10<sup>10</sup></b> (CM-1&2a, STF)	-- FNAL-ASTA (E. Harms, AWLC14 May 2014) KEK-STF report (Y. Yamamoto, STF, 2016)
加速空洞の加速勾配・単体検査値	≥35(±20%) MV/m ≥90%歩留	<33.4 MV/m> 82%の歩留 (@ 表面処理2回) 91%の歩留 (@ 表面処理3回)	Euro-XFEL製作時のILC仕様表面処理空洞のデータ (Nick Walker, ECFA LC2016) 注: 表面処理3回目 (超純水洗浄) を加える事で90% 歩留達成可能となる実績を示した。
ビームパルスの電流値	5.78mA	6mA (800μs beam pulse length)	DESY-FLASHの9mA-study, TDR vol-3 part I, p.80
ビームパルス内バンチ数	1312	2400 (800μs beam pulse length)	同上
各バンチの電荷数	3.2nC	<b>3nC</b> (800μs beam pulse length) <b>2nC</b> (800μs beam pulse length)	同上
バンチとバンチの間隔	554ns	333ns	同上
ビームパルス長	727μs	800μs	同上
加速RFパルス長	1.65ms	1.65ms	(このパルス長は定常的に達成している)
加速RFパルス(ビームパルス)の繰り返し	5Hz	10Hz	DESY XFEL

赤字は実績 日本学術会議 (2018/10/02)

## 超伝導空洞のマージン

SRF加速器5

空洞の性能が達成されない場合の対応

**【回答】**  
 250GeV ILCでは新たに2.5%(8000台の空洞のうち200台に相当)の余裕(全体で6%)で設計されている。また、電子側、陽電子側に600m程度の空きトンネルがあり、(予算は別途必要であるが)400台程度の空洞の追加が可能である。

	583m space												583m space		
	BC	ML	ML	ML	UND	5GeV BDS	IR	5GeV BDS	ML	ML	ML	ML	BC		
	e+inj					Ecm=250GeV				e-inj					
module space margin for option C, 31.5MV/m	51	90	189	189	24	module space				24	180	189	90	51	module space margin for option C, 31.5MV/m
	51	45	189	189	24	cryomodules				24	180	189	45	51	
	17	10	42	42	8	RF unit				8	40	42	10	17	
e- 134.8GeV =	10.0	12.8	53.5	53.5	5.0	E gain (GeV)				5.0	51.0	53.5	12.8	10.0	= e+ 132.3GeV +5.8%margin

日本学術会議 2018/9/13 84

## ILC 加速器技術達成状況

パラメータ	単位	要求仕様	設計仕様	達成値	実証場所など
<b>電子源技術</b>					
バンチ電荷	nC	3.2	4.8	8.0	SLAC-SLC
ビーム電流	μA	21	42	1,000	JLab
ビーム偏極度	%	80	80	90	名古屋大、SLAC、KEK
<b>陽電子源技術</b>					
バンチ電荷	nC	3.2	4.8	8.0	SLAC-SLC
陽電子偏極度	%	30	30	80	SLAC E166
<b>超伝導加速技術</b>					
モジュール加速勾配	MV/m	<u>31.5 (+/- 20%)</u>		~31.5	European-XFEL DESY, FNAL, JLab, Cornell, KEK,
空洞クオリティー値 ( $Q_0$ )		$10^{10}$		~ $10^{10}$	
9連空洞(単体)	MV/m	35 (±20%)		33.4 MV/m	
ビーム電流	mA	5.8		> 5.8	DESY-FLASH), KEK-STF
ビームバンチ数		1312		1312	DESY
バンチ電荷	nC	3.2		3	
バンチ時間間隔	ns	554		333	
ビームパルス長(時間)	μs	730		800	DESY, KEK
RFパルス長(時間)	ms	1.65		1.65	DESY, KEK, FNAL
パルス繰返し(周波数)	Hz	5		10	DESY
<b>ナノビーム技術</b>					
ATF-FFビームサイズ (y)	nm	37		41 at ATF (@ 1.3 GeV)	ATF hosted at KEK
ILC-FFビームサイズ(y)	nm	17		日本学術会議(2018/10/02)	

- Beam-dynamics issues associated with a long linac, including emittance preservation and HOM wakefield effects<sup>4</sup>.

Until construction of the ILC, the European XFEL will represent a unique facility in the world. The direct synergy with ILC will allow much of the operations experience and control system development to be directly applicable to the larger machine. Together with FLASH and the more directly dedicated beam-test facilities at KEK and Fermilab, it is expected that the European XFEL will prove invaluable in understanding how to effectively operate a superconducting linac of the scale of the ILC.

## 2.6 The S1-Global Experiment

The S1-Global program was proposed in early 2008 with the aim of carrying out a string test of superconducting RF cavities during the ILC-GDE Technical Design Phase. The proposal was to coordinate a global collaboration involving various institutions around the world that would bring together eight 9-cell L-band cavities and associated hardware components, install them in common cryostat modules (cryomodules), and demonstrate their operation. This proposal by the GDE received strong support from the collaborating laboratories and was completed in a three-year period, ending in 2011 [7].

Two cavities with blade tuners were provided by Fermilab, two with Saclay/DESY-tuners were provided by DESY, and four with slide-jack tuners were provided by KEK. Information on the cavities is summarised in Table 2.18. Prior to being brought together for assembly into cryomodules, each of these cavities was processed and individually cold tested by the contributing laboratory. The cryomodules were provided by KEK (Hitachi) and INFN (Zanon). Input-power couplers for the cavities were contributed by SLAC, DESY, and KEK. The RF wave-guide components were provided by KEK and SLAC.

**Table 2.18**  
Cavities used in the S1-Global experiment

Cryomodule position	Cavity name	Company	Institute	Tuner	Coupler
C1	TB9AES004	AES	FNAL	Blade	TTF-III
C2	TB9ACC011	ACCEL	FNAL	Blade	TTF-III
C3	Z108	Zanon	DESY	DESY	TTF-III
C4	Z109	Zanon	DESY	DESY	TTF-III
A1	MHI-05	MHI	KEK	S-J central	KEK-STF
A2	MHI-06	MHI	KEK	S-J central	KEK-STF
A3	MHI-07	MHI	KEK	S-J lateral	KEK-STF
A4	MHI-09	MHI	KEK	S-J lateral	KEK-STF

The programme successfully addressed such critical issues as plug-compatibility of hardware components (i.e. that parts must be compatible but not necessarily identical), as well as single- and multiple-cavity operation with pulsed microwave power and associated LLRF controls. While the S1-Global program did not involve beam operations, it covered all the essential steps required prior to beam acceleration in a superconducting linac.

The configuration and setup are shown in Fig. 2.38 and Fig. 2.39. The participating institutions contributed their hardware and human resources on an equal footing, and closely shared the experience of assembling a complex superconducting linac whose component designs and manufacturing were remotely coordinated. The STF site at KEK was selected as the host site, so as to take advantage of a one-year time slot that was available at the STF.

<sup>4</sup>while important experience can be gained from the European XFEL, the direct application to ILC is limited due to the factor of 500 difference in (vertical) emittance.