

国際大型加速器計画のコスト削減に関する調査研究

資料1

道園真一郎
KEK加速器研究施設

調査研究の目標

ILCのTDRを精査し、**加速器、測定器はもとより、加速器土木(トンネル本体や地上施設)などを含めてコスト削減につながる要素技術の研究開発課題について調査研究を行う。**また、日米共同で進められるコスト削減の課題についても、世界的な動向について調査を行うとともに、本機構でも研究調査を行う。各成果目標については以下の通りである。

(1) **現在コスト削減のための研究開発が進められているか、他の加速器プロジェクトで採用されつつある項目**

日米共同で進められている研究開発(「新ニオブ材料」および「高電界・低損失空洞」)など、ILCのコスト削減のために進められている研究開発課題や他の加速器などで進められている研究開発課題について研究調査を進め、コスト削減の効果を評価する。

(2) **中長期的な研究課題**

コスト削減に結び付く中長期的な研究開発課題(10年程度の研究開発期間を要するもの)について広く調査を行う。

(3) **加速器土木関係の研究開発項目**

加速器土木関係の研究開発項目について、建設コスト削減につながる項目を提示、コスト削減効果を見積もる。

(4) **測定器本体の研究課題**

測定器本体のコスト削減に結び付く研究開発課題について広く調査を行う。

(5) **超伝導加速以外の加速方式**

現在提案されている常伝導リニアコライダー(CLIC)および新しい加速技術であるプラズマ加速についても、研究開発の現状について調査を行う。

調査研究の方法

(1) 整備コスト削減に関する要素技術の研究開発課題の探索・検討

エリアシステム(電子源、陽電子源、ダンピングリング、主線形加速器、最終収束系、検出器、加速器土木)ごとに精査する。新たな研究開発によりコスト削減につながるものの探索・検討を行う。

(2) 要素技術の研究開発課題に係る削減効果額、研究開発期間、研究開発費用

本項の(1)で行われた探索・検討をもとに、各々の研究開発課題についてILC計画に採用された場合の削減効果や研究開発に必要な期間、金額などについても見積もる。コスト削減については、TDRの土木建築を含む加速器および測定器本体建設に関わる費用の見積もりを参考にして効果の算出を行うこととする。

国際大型加速器計画のコスト削減に関する調査研究委員会

氏 名	所属・職名
芥 川 真 一	神戸大学 大学院工学研究科 教授
池 田 直 昭	三菱重工機械システム株式会社 設備インフラ事業本部 制御技術部 部長
柏 木 茂	東北大学 電子光理学研究センター 准教授
○上垣外 修 一	理化学研究所 仁科加速器研究センター 加速器基盤研究部 部長
神 門 正 城	量子科学技術研究開発機構 関西光科学研究所 高強度レーザー科学 研究グループリーダー
◎熊 谷 教 孝	公益財団法人高輝度光科学研究センター 名誉フェロー
佐 藤 潔 和	東芝エネルギーシステムズ株式会社 京浜事業所 技監
竹 内 一 浩	株式会社日立製作所 原子力ビジネスユニット 原子力事業統括本部 原子力事業技術センタ シニアプロジェクトマネージャ
田 中 均	理化学研究所 放射光科学総合研究センター 副センター長
細 貝 知 直	大阪大学 大学院工学研究科 准教授 ／理化学研究所 放射光科学総合研究センター 先端光源開発研究部門 レーザー加速開発チーム チームリーダー
山 本 明	CERN Guest Professor
山 本 均	東北大学 大学院理学研究科 教授

◎は委員長、○は委員長代理

コスト削減評価

TDRに記載されたコスト(2012年1月時点のコスト)から、新しい研究開発によってどの程度コスト削減できるかを評価した。機器ごとにコスト算出の方法が異なり、また、TDRではGlobal Design Effortによる国際的な見積もりを利用しており、現時点での物価変動や為替変動を個々の要素に繰り込むのは容易ではないためである。

ここでは、研究開発の成否(ILCに適用できるかどうか)を評価する期間と費用を見積もっている。新しい技術を使った研究開発であるため、研究開発の成否だけでなく、成功した場合のコスト削減の効果についても不確定性があることには留意が必要である。結果として、想定していたコスト削減に至らない可能性もあるため、ここでは最大限のコスト削減効果を含めて幅を持って評価している。また、研究開発による削減効果には、研究開発に必要な費用を差し引くことは行っていない。

今回の研究開発として取り上げた項目は、いずれも世界中で研究開発が進められつつあるものである。世界的な研究開発の中で日本国内で取り組む部分の期間と費用を提示している。実際のコスト削減研究開発の成功のためには国際的な協力が前提となっている。

多くの空洞や入力カプラを利用する超伝導加速器部分は、ILCに適用できる場合も、量産化について別途検討が必要である。ILC建設の準備期間では、システムのプロトタイプを作って量産化を評価することが考えられており、今回の研究開発の費用には含まれていない。

大量生産においては、生産性の向上もコスト削減に大きく寄与する。TDRにおいては、ラーニングカーブなどにより大量生産の効果を取り込んでいるが、本調査研究においては具体的な大量生産によるコスト削減効果については調査の対象としていない。

加速器本体(加速器土木を含む)の研究開発項目

現在コスト削減のための研究開発が進められているか、
ほかの加速器プロジェクトで採用されつつある項目

下記のものは、すでにILCコスト削減のために研究開発が進められているか、あるいはほかのプロジェクトで採用されつつある項目で、**研究開発として短期的なスパンで結果を出すことが見込めるものである**。
削減効果については、**加速器土木を含む加速器本体の建設費用**(TDRで7,980 MILCU (ILCUは2012年1月の米国ドルで定義される仮想通貨)、日本円換算で約8,300億円)**に対するコスト削減の割合**を示した。

項目	研究開発に必要な期間	研究開発に必要な費用	研究開発による削減効果
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	～3年	1.3億円	1.2～2.5%
高電界・低損失実現のための超伝導高周波空洞の表面処理(N-Infusion)	～3年	7.7億円	2.7～5.5%
N-Infusionによるトンネル長の削減*			0～1.6%
N-Infusion活用のための高周波系の研究開発	～4年	3.7億円	0.3～0.5%
入力カプラ	～5年	0.4億円	0.5～1%
電解研磨	～3年	2.4億円	1.3～2.6%
DRおよびRTML、BDSでの永久磁石の利用	～3年	0.5億円	消費電力最大10.5 MW (偏向磁石) および9.1 MW (四極磁石)の節約

日米コストダウンR&Dで
取り組み中

*N-Infusionが成功した場合、空洞数は10%削減されるが、**アンジュレータ方式の陽電子生成の場合は、電子と陽電子を衝突させるタイミングをそろえるためにトンネルの長さ**に制約が入り、**トンネル長は短くならない**。その場合、削減効果は見込めない。

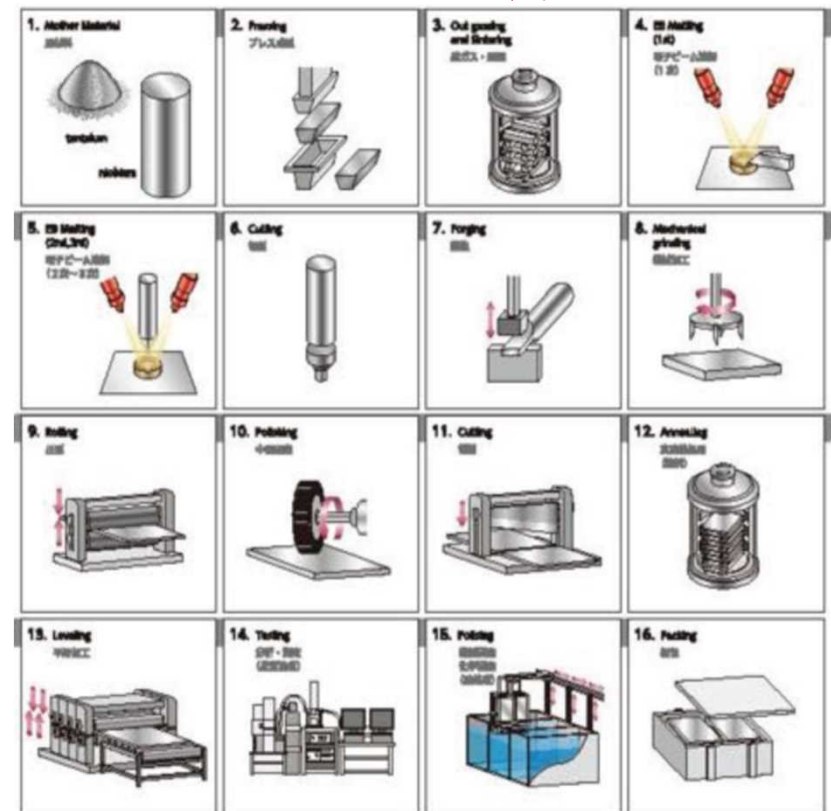
これらの研究開発項目は、たとえば、N-Infusionが成功した場合は空洞台数が減るため材料の費用や入力カプラの個数なども減少する。このため、最終的な成果は**単純な足し算とならないことに注意が必要**である。3～5年で実現できる研究開発がすべて成功した場合は、前に述べたような重複効果を除くと、**TDR (ILC 500 GeV) の場合、5～11%程度となる**。

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

ニオブ(Nb)材料費は、TDRで見積もられた全体コスト見積もりの5~6%を占め、重要な検討候補となる。超伝導加速空洞の高性能化を堅持しつつ、材料費のコスト削減を実現する方策として、以下の2点に着目する：

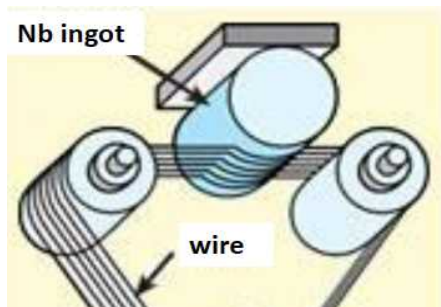
- Nb材料精錬過程における「純度および残留抵抗比(RRR: Residual Resistivity Ratio)」の最適化
- Nb精錬後のインゴットからの「直接切り出し法」による空洞用ディスク材の製造

工程	従来・工法 (FG)	コスト削減・工法 (LG)
インゴット製造：電子ビーム溶解・精錬 →残留抵抗値(RRR)	≥ 300	≥ 200 , 平均: ~ 250
インゴット →ディスク成型	鍛造→圧延 →機械研磨 →シート・カット	直接ディスク 切り出し
表面仕上げ 結晶粒界(Grain)	化学研磨 Fine (< 1 mm)	化学研磨 Large (5~10 cm)

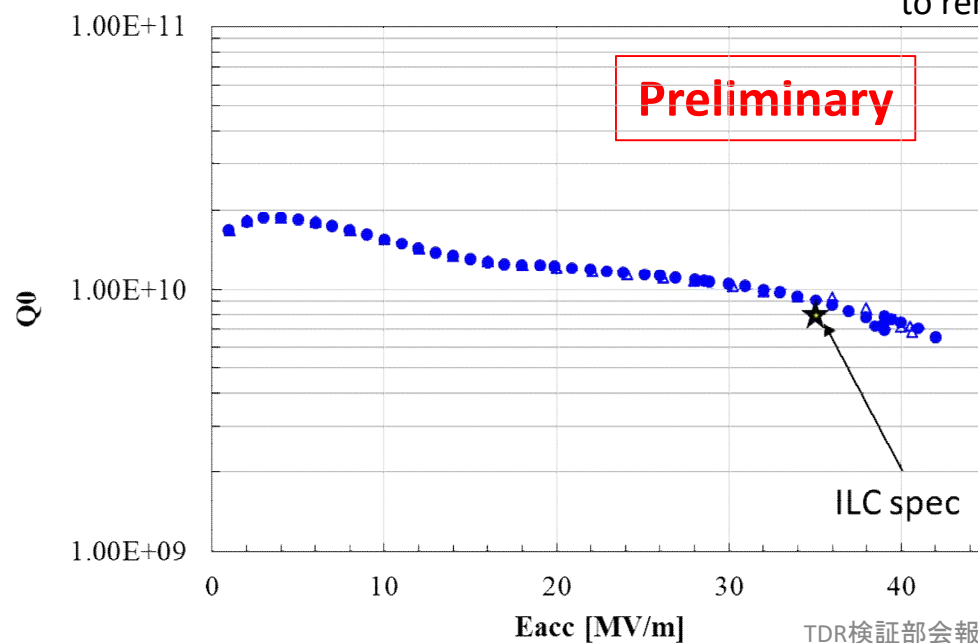
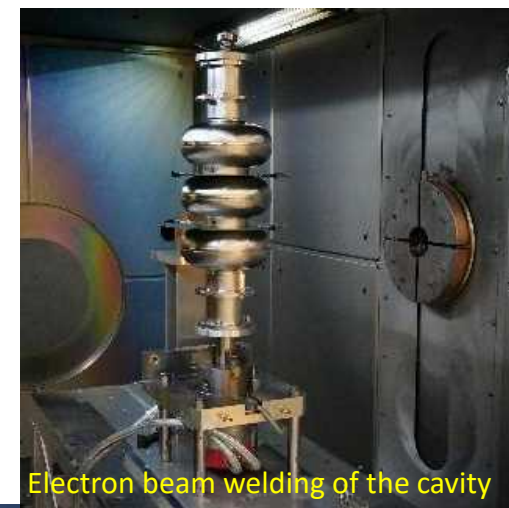


2017年度のKEKにおける成果

インゴットから切り出した材料を使って3セル空洞を製造



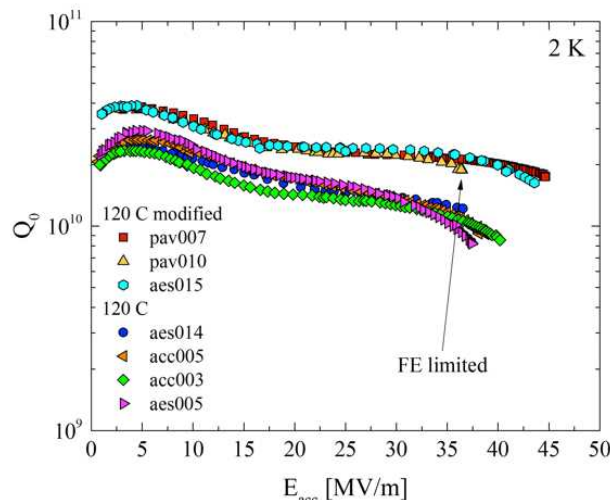
Annealed for $800^{\circ}\text{C} \times 3\text{hrs}$ to remove stresses.



- ILCの仕様を満たし、42MV/mまで到達。

高電界・低損失実現のための 超伝導高周波空洞の表面処理(N-Infusion)

N-Infusion(窒素インフュージョン)の技術は、米国のフェルミ研究所にて開発された。超伝導加速空洞の処理工程の一つに加熱真空炉における800℃、3時間の高温熱処理による脱ガス・応力除去の工程がある。この熱処理後の冷却中に120℃、48時間の間25 mTorr (3.3 Pa)程度の窒素を真空炉に導入する工程を加え、ニオブ製空洞の表面(10 nm程度)に微量の窒素を拡散させることにより、加速勾配・Q値ともに向上させる事ができる。ILC用の標準的な表面処理を行った空洞と比較して、加速勾配で約10%、Q値で約2倍(35 MV/m)の性能向上を示す実験結果が得られている。



N-Infusionを行った1.3 GHz単セル空洞の性能。図中“120 C modified”と書かれた空洞がN-Infusionを適用した空洞。“120 C”と書かれた空洞がILCの通常処理が施された空洞。図中の“FE limited”は電界放出による性能制限。

表面処理工程の比較

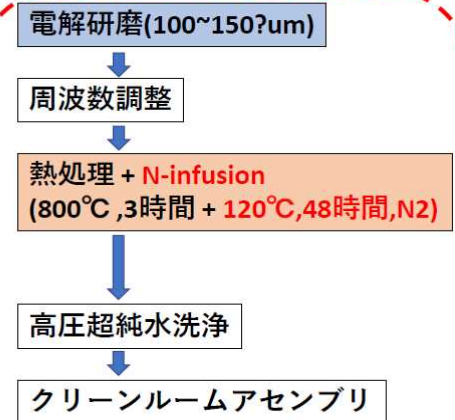
ILC標準レシピ



※ 空洞性能に効く工程



N-infusion

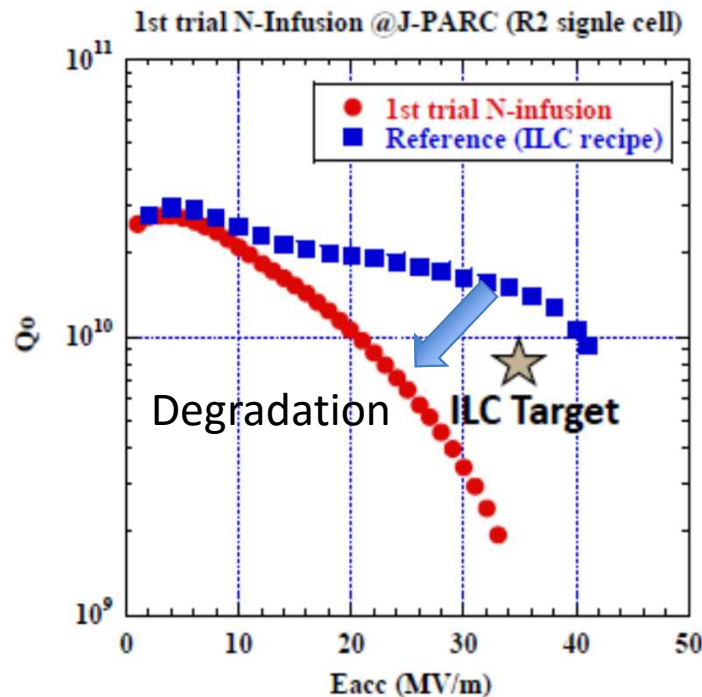
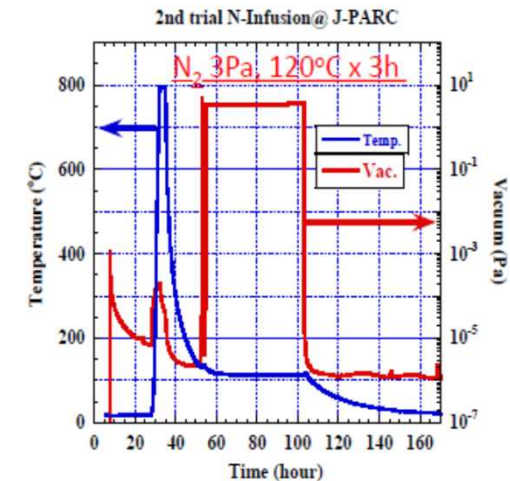


※ 全ての工程が空洞性能に寄与

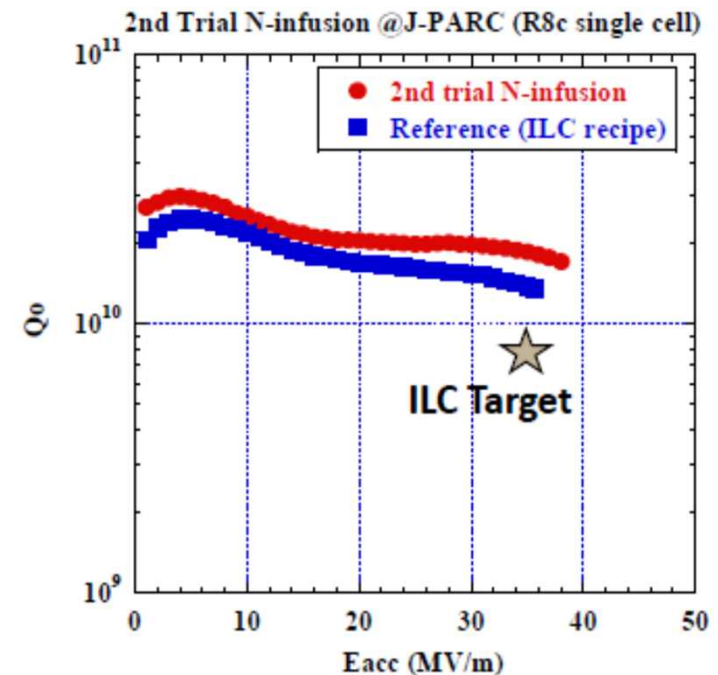
- 電解研磨の工程が1回減る
- 真空炉での熱処理で空洞性能を劣化させない事が必須条件

2017年度のKEKにおける成果

- 最初のN-Infusionはうまくいかず、むしろ性能が劣化した。
- プロセス中の残留ガスが問題となっている可能性があったため排気系を変更した。
- 2回目のトライでは、性能の向上を確認できた。(Q値で35%増、電界で+5%)
- さらに処理のパラメータを最適化することが必要。



真空排気系の強化



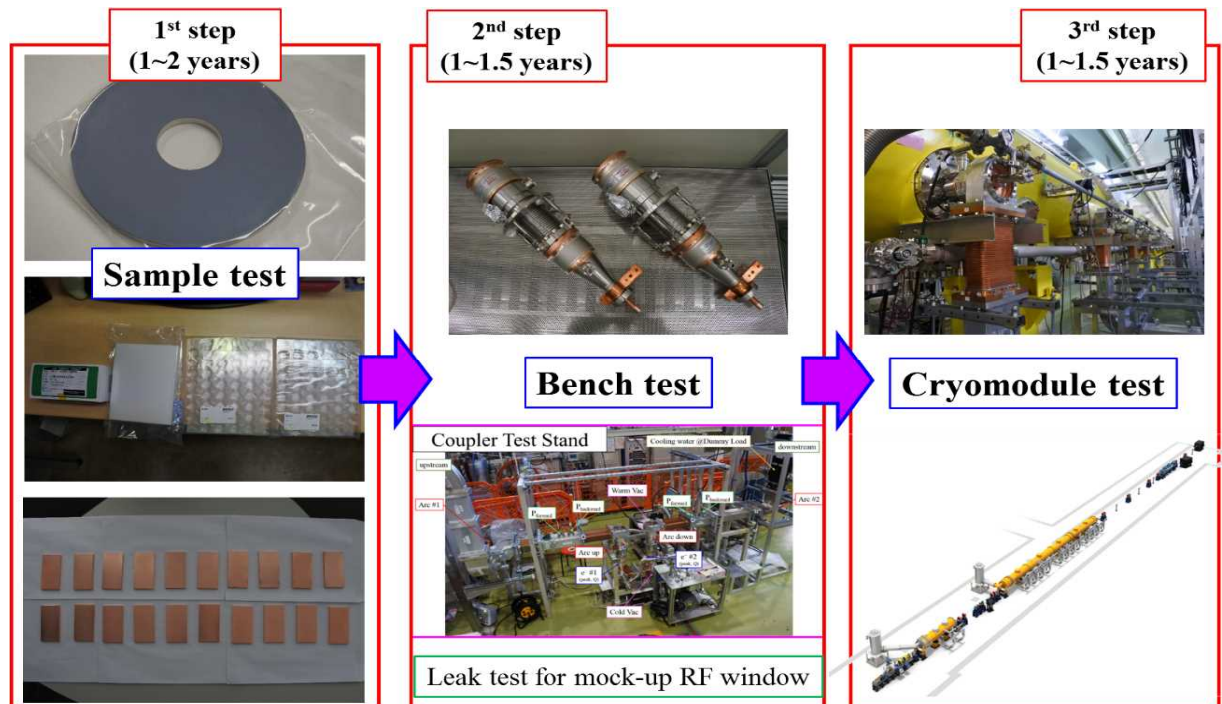
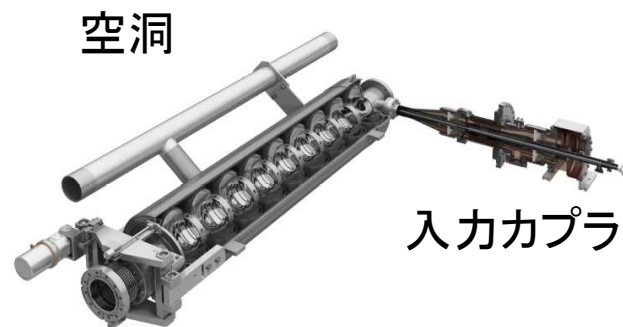
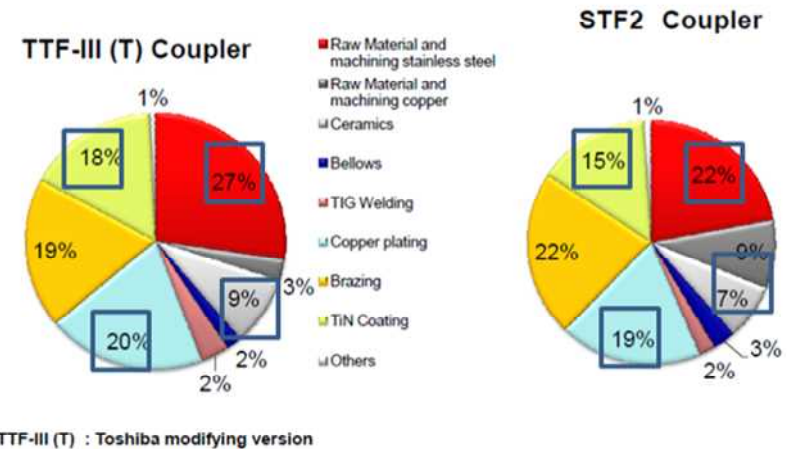
入力カプラ

超伝導加速空洞に大電力高周波を送り込むための同軸型の高周波機器のことをカプラと呼ぶ。ILCで検討されているカプラのデザインには2種類あり、主に欧米で使用されてきた**DESYのTTF-3型**と主にアジアで使用されてきた**KEKのSTF-2型**である。

材料および加工費、ロウ付け費、銅メッキ費、窒化チタン(TiN)コーティング費の四つが大部分を占めている

セラミック材料、コーティング、銅メッキの三つがコスト削減の候補。

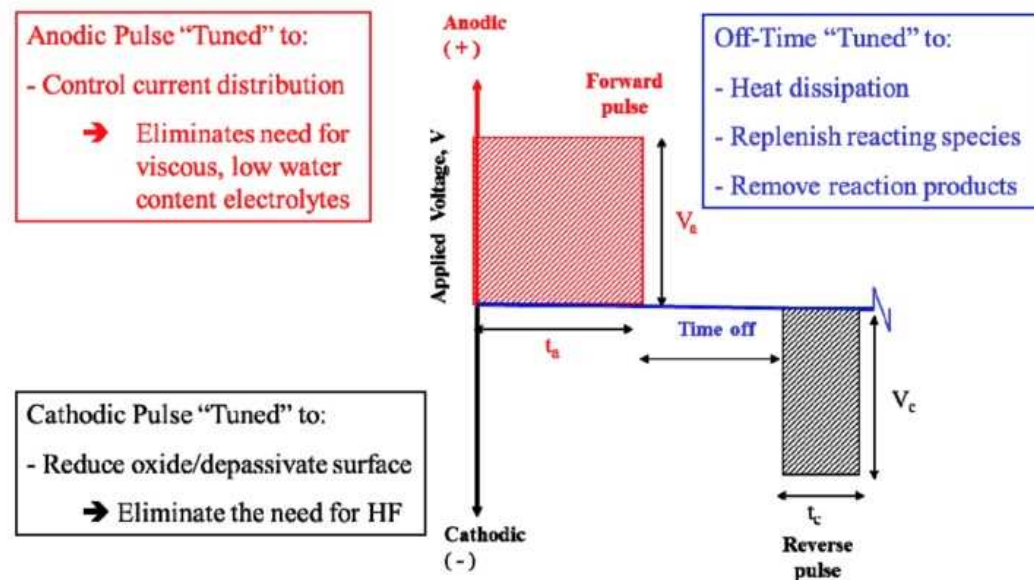
Cost Estimate of TTF-III and STF2



電解研磨

ILC用超伝導加速空洞の製造後、加速性能を出すために行う表面処理プロセスは、製造した全空洞に必要である。そのプロセスは、電解研磨処理、超音波洗浄処理および超純水高圧洗浄からなり、**1台の空洞あたり2回のプロセスを行い、ILC仕様の加速勾配性能が出ない場合にはさらにもう1回プロセスすることになっている。**

縦型電解研磨で設備構造の簡素化をはかる。パルス的に極性を交互に変える電圧を印加する**バイポーラ電解研磨**では、**濃硫酸とフッ化水素酸の混合液を、希硫酸溶液に置き換えることが可能となり、電解液循環装置の製造コスト低減と廃液処理コストの低減が可能になると考えられる。**また、危険度の極めて高いフッ化水素酸を扱う作業より希硫酸を扱う作業では危険度リスクが大幅に下がり、かかる人件費も下がるものと考えられる。



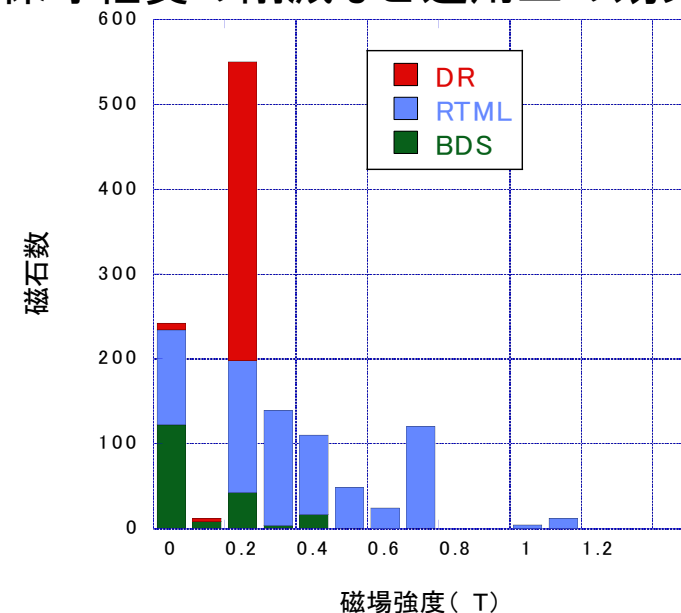
DRおよびRTML、BDSでの永久磁石の利用

永久磁石を用いた偏向磁石や四極磁石のプロトタイプ開発が進められている。特に放射光リングの高度化計画では、水平方向の低エミッタンス化のために、偏向磁石の磁場を弱くすると共に段階的に強度を変えるビーム光学方式が見いだされ、結果として台数が増えることになり、運転コストを抑えた設計が強く求められた。**ESRFの高度化計画(ESRF-EBS)では、偏向磁石をアーク部セルあたり2台の電磁石から4台の永久磁石にする設計が採用され、2017年5月にはリングで必要とする偏向磁石128台中47台の組み立てが完了している。**

TDRでは、**偏向磁石のみの電力使用の合計は10.5 MW**となり、年間の電気代で最大約7.8億円の削減効果となる。さらに**全ての四極磁石も永久磁石とした場合は、合計19.6 MW、最大で年間14.7億円の削減**が可能となる。これに加えて保守経費の削減など運用上の効果は大きい



5連の永久磁石ユニットからなるESRF-EBSの偏向磁石



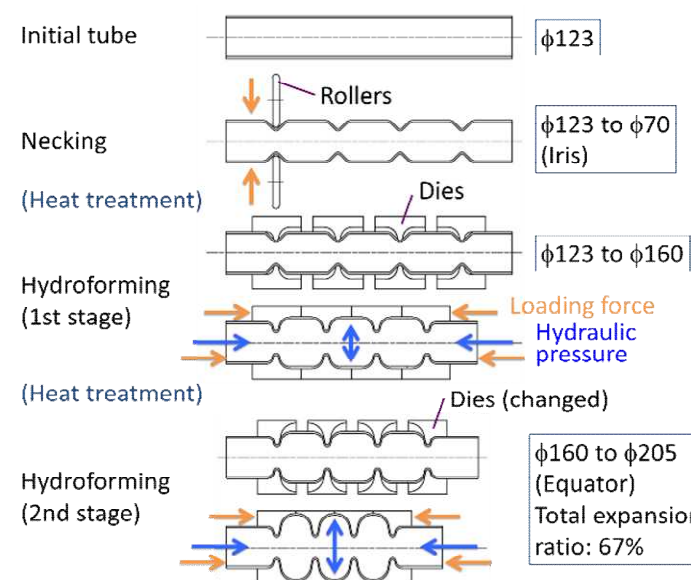
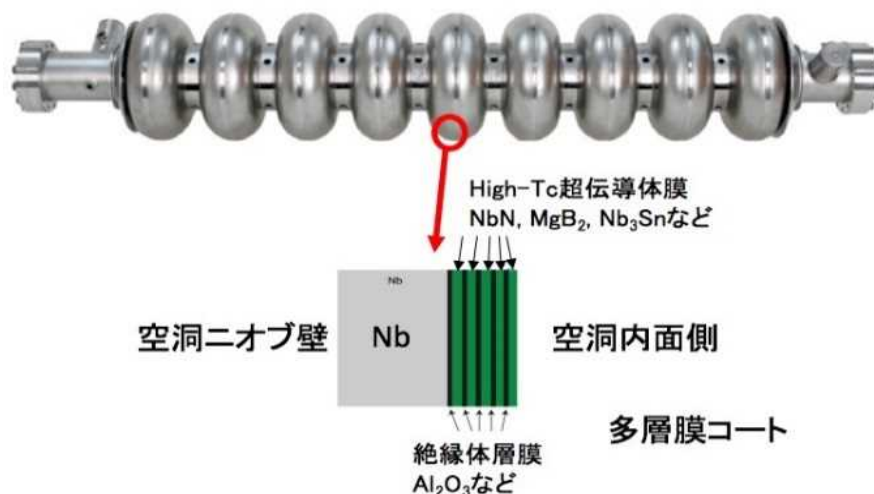
TDRにおける偏向磁場強度分布

加速器本体(加速器土木を含む)の研究開発項目

中長期的な研究開発課題(10年程度の研究開発期間を要するもの)

下記の二つの研究開発項目は、2015年のILC Progress Reportにも記載されており、将来有望な研究開発項目であるが、実用化のためには、まだ10年程度のスパンの開発期間が必要と考えられる。

項目	研究開発に必要な期間	研究開発に必要な費用	研究開発による削減効果
超伝導薄膜	10～20 年	11.3億円 (10年)	10年後で2～4%
液圧成形	～10年	3.2億円	1～2%

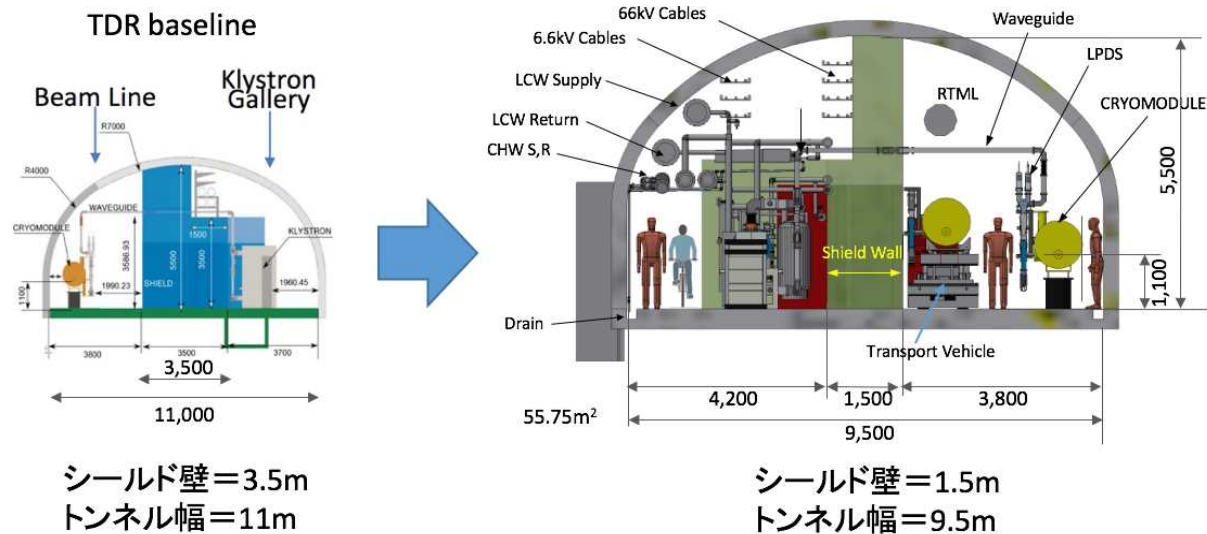


加速器本体(加速器土木を含む)の研究開発項目

加速器土木関係の研究開発項目

下記のうち、中央シールド壁厚変更、ヘリウム冷凍機配置変更、測定器ホールアクセスの最適化については、**TDR以降にLCC(Linear Collider Collaboration)内で検討されILC Progress Reportに記載されている項目で、すでに概略については評価が行われているものである**。削減効果については、加速器土木を含む加速器本体の建設費用(TDRで7,980 MILCU、日本円換算で約8,300億円)に対するコスト削減の割合を示した。

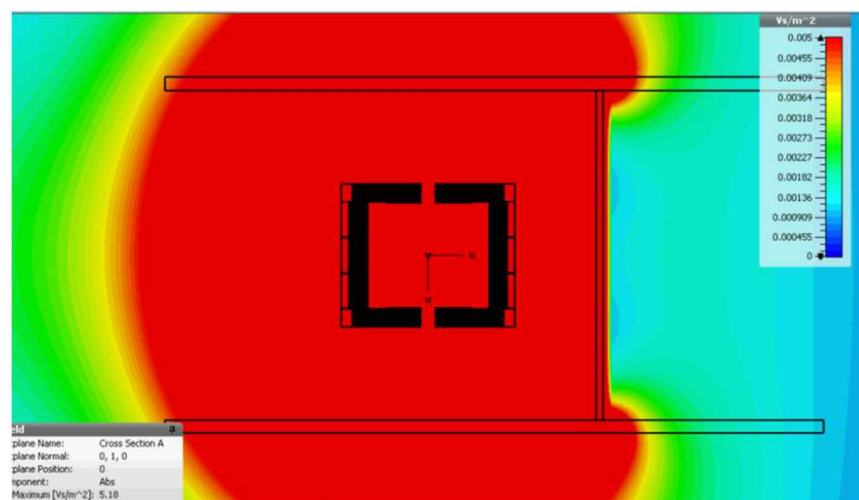
項目	研究開発に必要な期間	研究開発に必要な費用	研究開発による削減効果
中央シールド壁厚変更	机上検討2ヶ月	500万円	1.5%程度
ヘリウム冷凍機配置変更	机上検討2ヶ月	500万円	0.1%程度
測定器ホールアクセスの最適化	机上検討2ヶ月	500万円	0.1%程度
加速器配置の最適化	机上検討2ヶ月	500万円	0.2%程度



測定器本体の研究開発項目

測定器本体については、「リターンヨークの鉄の量の削減」および「新しい超伝導線材の開発」がコスト削減の可能性のある項目として挙げられている。コスト削減に関する検討がILCのLCC内でも検討が始まったところであり、コスト削減の効果の評価についてはまだ見極められていない。

ILCにおいては2台の測定器が交代で実験を行う。片方の測定器が衝突点に設置され、実験を行っている間、もう一方の測定器は少し離れた位置（中心軸間距離で28 m）でメンテナンス作業を行うか、待機の状態となる。このメンテナンス作業を行う際に危険を生じないように、実験中の測定器の超伝導電磁石からの外部への漏れ磁場に対して、ビームラインから15 m離れた位置で50ガウス以下という要件が課された。測定器内部の飛跡検出領域空間に3.5 T (ILD) ないしは5 T (SiD) の強力な磁場を作りつつこの要件を満たすためには大量の鉄を用いたリターンヨークが必要となる

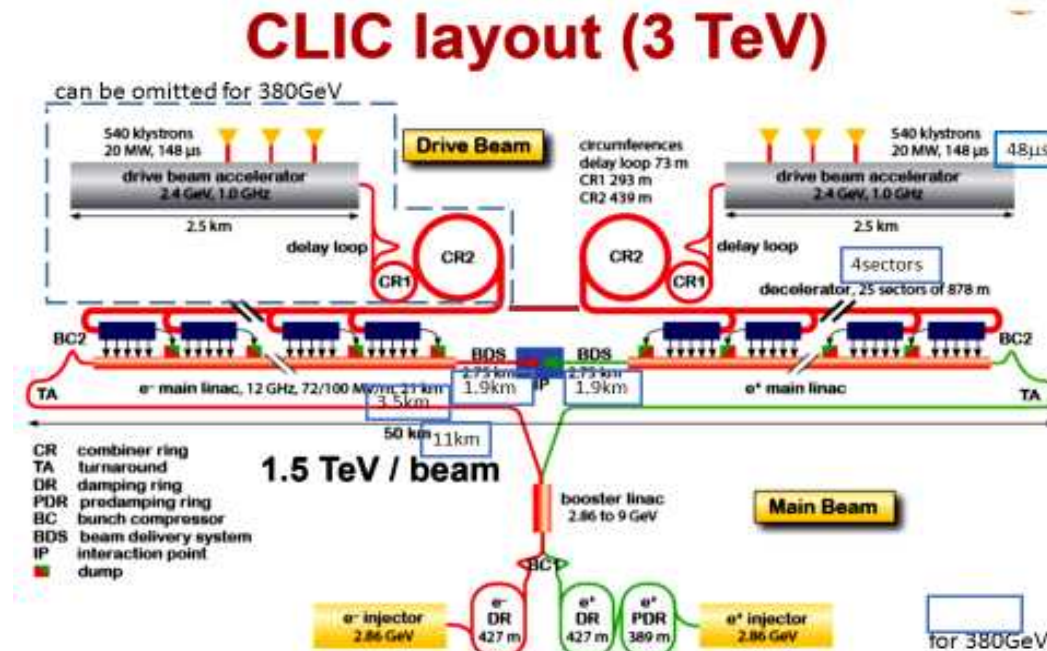


リターンヨークの鉄の量を減らし、鉄の壁を測定器の中心から13 mの位置に設置した場合の磁場分布。スケールの単位はテスラ (T)。0.005 T (50ガウス) 以上の領域はすべて赤で表されている。

超伝導加速以外の加速方式

今回、常伝導リニアコライダー(CLIC)およびプラズマ加速についても調査を行った。CLICはILCより高い衝突エネルギー(3 TeV)を最終ゴールとしており、まだ研究開発が必要な段階である。コスト的には誤差の範囲でILCと同じと評価された。プラズマ加速については、コスト削減の効果は見通せなかったが、将来的に有望な加速器技術と考えられる。

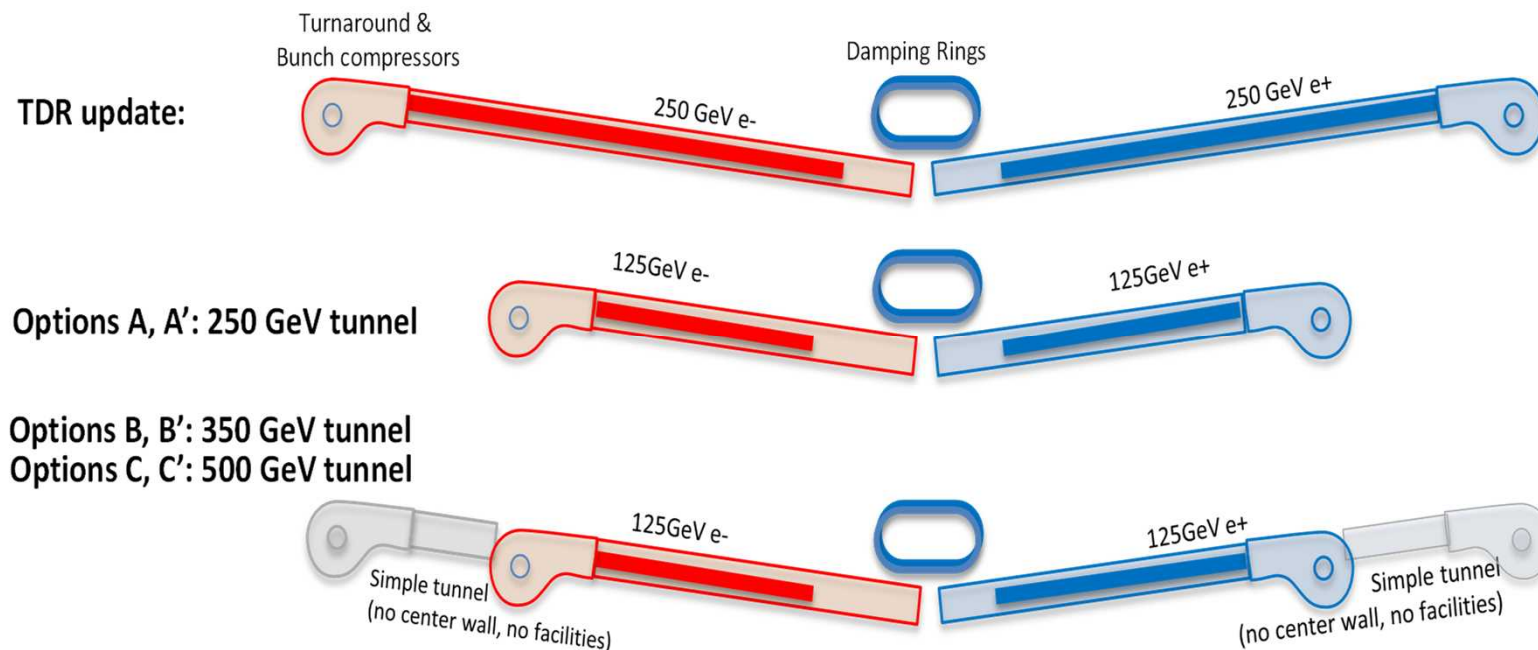
項目	研究開発に必要な期間	研究開発による削減効果
常伝導リニアコライダー	8年	-
プラズマ加速	18～23年	現在のところ、削減効果は見通せない。しかし、将来的に非常に有望な次世代加速器技術である。



補遺: ILC250GeVについて

2017年11月に国際将来加速器委員会 (ICFA: the International Committee for Future Accelerators) は、250 GeVで運用する国際リニアコライダー (ILC) の建設を支持する声明を発表した。リニアコライダー・コラボレーション (LCC: Linear Collider Collaboration) より提出されたマシンレポート及び物理レポートに基づくものである。

このマシンレポートでは、ILC 250 GeVの構成として、Option A, B, Cの三つの検討がなされており、それぞれ、加速器は250 GeV衝突エネルギーを実現するものであるが、Option Aが250 GeV用のトンネルであるのに対し、Option BおよびCでは、350 GeVおよび500 GeVにエネルギー増強可能なシンプルなトンネル (中央部の隔壁がなく、また、空調もない) を含んだ構成となっている。いずれの場合も主線形加速器部分の長さが半分となり、全長が20 km程度となる。



補遺: ILC250GeVについて

本調査研究でも取り上げた、以下の研究開発が成功した場合のコスト削減の効果も繰り込んだコスト見積もりも行われている。

- 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
- 高電界・低損失実現のための超伝導高周波空洞の表面処理(N-Infusion)
- 入力カプラ
- 電解研磨

これらは、Option A', B', C'と定義されている。Option A~C,A'~C'のコストについては、**本調査研究と同様、TDRのコストとの比較において算出されている(TDRと同時期の物価、為替レートなどを前提に比較されている。)**。

	e+/e- collision [GeV]	Tunnel Space for [GeV]	Value Total (MILCU)	Reduction [%]
TDR	250/250	500	7,980	0
TDR update	250/250	500	7,950	-0.4
Option A	125/125	250	5,260	-34
Option B	125/125	350	5,350	-33
Option C	125/125	500	5,470	-31.5
Option A'	125/125	250	4,780	-40
Option B'	125/125	350	4,870	-39
Option C'	125/125	500	4,990	-37.5

ILC 250 GeVにおけるコスト削減効果

削減効果は、Option Aのコスト5,260 MILCUの日本円へのTDR当時の単純換算5,470億円に対するコスト削減による割合で示している。ILC 250 GeVの場合は、主線形加速器の長さが約半分となるため、超伝導直線加速器部分に関するコスト削減額は約半額となる。重複効果を除くと、ILC 250 GeVの場合、4～8%程度のコスト削減効果となる。

また、加速器土木に関するコスト削減については、TDR以降にLCC内で検討されILC Progress Reportに記載されている項目で、これらの提案を含んだものとなっており新たに削減されるものではない。

項目	研究開発によるILC 250 GeV における削減効果	
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	0.9～1.9%	日米コストダウンR&Dで 取り組み中
高電界・低損失実現のための超伝導高周波空洞の表面処理(N-Infusion)	2.0～4.1%	
N-Infusion活用のための 高周波系の研究開発	0.2%～0.4%	準備期間に実施
入力カプラ	0.4～0.8%	
電解研磨	1.0～2.0%	

Option A'には上記のR&Dの成果を組み込んでいる