

TIG 溶接を用いた銅製超高真空ダクトの製作

FABRICATION OF ULTRA HIGH VACUUM COPPER DUCT USING TIG WELDING

牛谷 唯人[#], 山本 将博, 谷本 育律, 舟橋 義聖, 東 憲男, 井上 均, 文珠四郎 秀昭
Yuito Ushitani[#], Masahiro Yamamoto, Yasunori Tanimoto, Yoshisato Funahashi, Norio Higashi,
Hitoshi Inoue, Hideaki Monjushiro
High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Japan

Abstract

The next-generation light source plan (KEK-LS), which is under consideration at KEK, plans to apply NEG coating to the inner surface of the duct for almost all sections. We adopt silver-containing oxygen-free copper (AgOFC) which can realize a softening temperature of 350 °C, as a vacuum duct material in order to activate the coated NEG film. This paper summarizes the development of TIG welding technology for pure copper. Various conditions for good TIG welding with respect to phosphorus deoxidized copper and oxygen free copper were investigated and the evaluations were carried out by temperature distribution measurement at the time of welding by radiation thermometer, cross section observation by SEM, composition analysis by EDS, the ultra high vacuum test of copper ducts by TIG welding.

1. はじめに

KEKにて検討が進められている次期光源加速器計画(KEK-LS)[1]では全周のダクト内面に NEG コーティング(Non-Evaporable Getter coating)を施す計画となっている。ダクトの外周部は放射光が高いエネルギー密度で照射されることから冷却の点で熱伝導性の優れた材料を使うことが必須条件であり、またコーティングされた NEG 膜を活性化するために最低でも 250°C程度までの加熱に耐える材料であることが求められることから、熱伝導率は無酸素銅と同等で軟化温度 300°C以上が実現できる銀入り無酸素銅(AgOFC)を真空ダクト材料として採用する。一方で、銅の接合についてはロウ付けや電子ビーム溶接が一般的であるが、実際の複雑な長尺ダクトを製作するには銅材料同士を TIG 溶接により接合する技術が不可欠であることからその技術開発を行った。

一般的に銅は難溶接材であり、TIG 溶接の際は材質の熱伝導の高さから電流を上げる必要がある。電流の上げ過ぎによる溶融防止のため高低差のある電流を一定間隔で流すパルス溶接を採用、再現性のためにトーチを固定してターンテーブルを回転し、酸化防止のためにパイプ内部は不活性ガスを流して裏波溶接を行った。溶接試験を通して溶接時の温度管理が溶接の成否を決める重要な要素であることが分かり、溶接時の銅管温度を放射温度計での計測を試みた。溶接部の評価は、断面の SEM 観察および EDS 分析を用い、真空評価として He リークテスト、ベーキング後の到達圧力、ヒートサイクルおよび残留ガス分析を行った。これらの結果および考察について以下にまとめる。

2. 溶接試験

2.1 溶接方法と使用機械

一般的に銅は熱の逃げ易さやブローホール、割れの発生のし易さから難溶接材とされている。熱伝導率が炭

素銅と比べ約 8 倍以上高いため、局部的に加熱され難く、十分な溶け込みを得られ辛い。しかし溶接条件を上げ過ぎても溶け落ちや割れ、ブローホール発生の原因になる。それらを踏まえた条件設定と溶接技術の両方揃ってなければ良好な銅の溶接を行う事は出来ない。

今回の AgOFC 管突合せ溶接では溶棒を使用せず、溶接トーチを治具で固定しターンテーブルを用いて銅パイプを一定速度で回転させる半自動の溶接方法を採用した。この方法は溶接操作がターンテーブル回転の ON/OFF とトーチの ON/OFF だけで容易であり、SUS パイプ突合せ溶接の経験から再現性の高い方法である。溶接機には Panasonic YC-300BP4 を使用した。

溶接の際はパルス溶接を採用した。通常の TIG 溶接は直流電流を一定に流すのに対し、パルス溶接は大きい直流電流と小さい直流電流を一定周期で流す方法である。これは溶融防止と良好な裏波ビードを出すのが狙いである。パルス溶接の概略を Figure 1 に示す。また、管内部の酸化防止のために管端から治具を用いてパイプ内部にアルゴンガスを供給し、反対側には丸めたアルミホイルを詰めている。溶接風景を Figure 2 に示す。

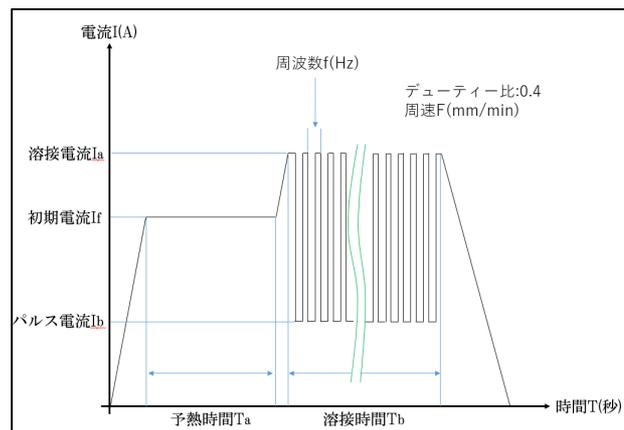


Figure 1: Outline of pulse welding.

[#] ushitani@post.kek.jp

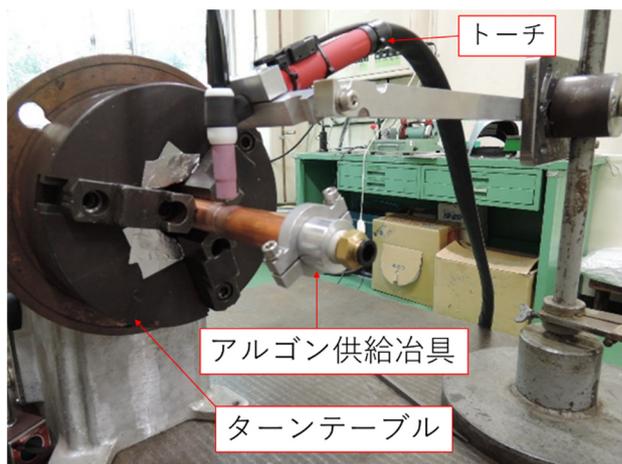


Figure 2: Welding landscape.

2.2 溶接条件

AgOFC 管は高価な材料のため、最初の条件出しの溶接試験は市販のリン脱酸銅管(C1220T)を用いた。管の長さは 50 mm と 100 mm の 2 種類のテストピースを用意した。今回使用した AgOFC 管は SH カッパープロダクツ (現在は日立金属商事) にて製造し、組成として 0.03% の銀が含まれている。管の太さは文献[1]の KEK-LS CDR に倣い外径 ϕ 28 mm、内径 ϕ 25 mm の管を採用した。

TIG 溶接の判定基準は管内部に出来る裏波ビードで判断を行う。判定基準は以下の二点で両方満たして良好(O)、どちらか一点だけなら良(Δ)、どちらも満たさなければ不良(\times)とする。

- 全周均一に裏波ビードが出ている
- 裏波ビードの盛り上がりは 0.3mm 以内

2.2.1 材質: C1220T、長さ: 100mm

溶接条件表を Table 1 に示す。If(初期電流)、Ta(予熱時間)、Ia(溶接電流)、Ib(パルス電流)、f(周波数)、F(周速)、Tb(溶接時間)は Figure 1 に示すパラメーターである。1 回目の試験はパルス無しの溶接を SUS の TIG 溶接する際の周速で試みたが、熱が集中し過ぎて穴が空き、パルス溶接は必須である結果となった。2 回目以降から周速を徐々に上げていき、最終的に 257.3mm/min で安定した。これはパイプ 1 周に約 20 秒かかる計算であり、SUS の溶接条件と比べて約 2 倍の周速となった。3 回目の試験以降から初期電流を利用した予熱時間という項目を追加した。初期電流とは溶接前に主にアーク確認のために流す電流の事であり、これを母材の予熱に利用して良好な溶け込みと溶接熱の拡散を防ぐ事を目的としている。7 回目の試験以降から溶接時間の項目を追加し、より詳細に条件設定を行うようにし、9 回目の試験で良好な裏波ビードを得られる事ができた。

Table 1: Welding Condition Table (C1220T, L=100 mm)

#	If (A)	Ta (秒)	Ia (A)	Ib (A)	f (Hz)	F (mm/min)	Tb (秒)	判定
1	50		130			121.8		\times
2	40		130	40	2.0	204.5		\times
3	50	20	130	40	3.0	204.5		\times
4	60	25	130	50	3.0	201.3		\times
5	70	25	130	50	3.5	238.5		\times
6	75	25	130	45	3.5	238.5		\times
7	80	25	130	40	3.5	238.5	30	\times
8	80	30	130	40	3.5	238.5	40	Δ
9	80	30	130	38	3.5	257.3	40	O

2.2.2 材質: C1220T、長さ: 50mm

溶接条件表を Table 2 に示す。アルゴン排出側をアルミホイルから治具に変更し 1 回目の試験を行ったが、アルゴンの排気量が想定より少なく内部圧力が上昇し内側から破裂した。さらに管の長さが半分になった事でアルゴン供給治具が熱源に近くなりプラスチック箇所が融解した。2 回目の試験以降からはアルゴン供給治具を全て金属製の物に作り直し、排出側もアルミホイルに戻して試験を行った。5 回目の試験で良好な裏波ビードを得られたが、終わり際のビード幅が大きくなり少し不恰好となってしまった。7 回目の試験で 5 回目の時より良好な裏波ビードを得られた。長さ 100mm の試験と比べ、体積の増加に比例し電流値も増加する傾向となった。

Table 2: Welding Condition Table (C1220T, L=50 mm)

#	If (A)	Ta (秒)	Ia (A)	Ib (A)	f (Hz)	F (mm/min)	Tb (秒)	判定
1	80	30	130	36	3.5	257.3	40	\times
2	80	25	130	36	3.5	257.3	40	\times
3	80	25	130	36	3.5	257.3	40	\times
4	80	20	140	40	4.0	257.3	40	Δ
5	90	20	140	40	4.0	257.3	45	O
6	100	20	140	40	4.0	257.3	40	Δ
7	90	20	145	40	4.0	257.3	45	O

2.2.3 材質: AgOFC、長さ: 50mm

溶接条件表を Table 3 に示す。3 回目の試験以降から条件を変えずに試験を行い、7 回目を除いた 5 本全てのテストピースに良好な裏波ビードを得られることができた。7 回目の試験は 6 回目の試験後 10 分以内に試験を行った。そのためターンテーブルに前回の熱が残っており、裏波ビードが大きくなったと思われる。8 回目の試験では 7 回目の試験後 30 分以上時間を空けてターンテーブルが常温に戻ったことを確認してから試験を行い、良好な裏波ビードを得られた。これらの結果から再現性の高さを確認する事ができた。C1220 の溶接条件と比べると AgOFC の方が電流値が大きい傾向にある。熱伝導率が C1220T の約 15% 高く、熱が逃げ易いためと思われる。5,6,8 回目のテストピースを Figure 3 に示す。

Table 3: Welding Condition Table (AgOFC, L=50 mm)

#	If (A)	Ta (秒)	Ia (A)	Ib (A)	F (Hz)	F (mm/min)	Tb (秒)	判定
1	90	20	140	40	4.0	257.3	45	×
2	100	20	150	50	4.0	257.3	45	△
3	100	25	155	45	4.0	257.3	45	○
4	100	25	155	45	4.0	257.3	45	○
5	100	25	155	45	4.0	257.3	45	○
6	100	25	155	45	4.0	257.3	45	○
7	100	25	155	45	4.0	257.3	45	△
8	100	25	155	45	4.0	257.3	45	○



Figure 3: 5th, 6th and 8th test piece.

2.3 接合部の表面および裏面の拡大写真

良好な TIG 溶接が行われたサンプルを半割し、表側と裏側の溶接ビード部の拡大写真を Figure 4 に示す。両者共に送り速度(257.3 mm/min)と溶接時のパルスの繰り返し(4Hz)に合致した溶け跡が確認できる。その溶け跡に対してほぼ垂直に結晶粒界が並ぶ状況も確認でき、溶融後の冷却過程において温度勾配の向きを反映した模様となっている。



Figure 4: Enlarged picture of the front (left) and back (right) side of the Ag-OFC tube welding bead.

2.4 走査型電子顕微鏡(SEM)観察とEDS分析

良好な溶接条件で行われた TIG 溶接部断面の SEM 画像および EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) 分析の結果をそれぞれ Figure 5, 6 に示す。分析には、日立ハイテック社製卓上 SEM Miniscope TM3000 および同 SEM に搭載された Bulker 社 EDS システムを使用した。SEM による観察ではビード部断面は内部にボイドやクラックなどの欠陥は無く、EDS では母材測定結果には断面を研磨した際に残留した研磨剤由来のシリコンがやや多く検出されているものの、溶接ビード部の組成は母

材とほぼ同じで良好な溶接接合がされていると判断できる。

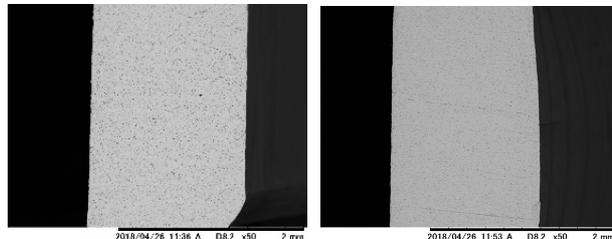


Figure 5: SEM images of the tube cross section. The left image is the AgOFC tube base material, the right image is the TIG welding bead part.

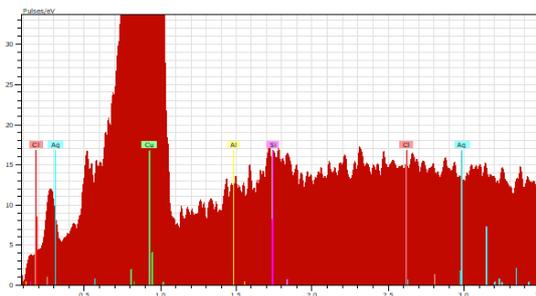
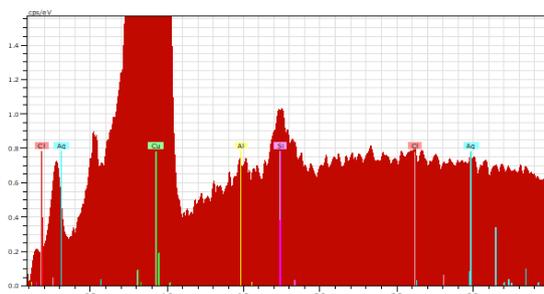


Figure 6: EDS analysis results. The upper figure is the base material of the AgOFC pipe, the lower figure is the TIG welding bead part.

2.5 溶接時の温度評価

今回の TIG 溶接は良好な接合が得られる条件は従来の溶接と比べ範囲が狭く、特に温度管理が成否を決める重要な条件であることが試験を通してわかってきた。TIG 溶接時の AgOFC 管の温度分布について放射温度計によるその場観測を行ったセットアップおよび測定結果を Figure 7 に示す。

一般的に金属の放射率は 0.1 以下と低く放射温度計による測温は難しいため、耐熱性の黒体塗料(ジャパンセンサー(株)製 JSC-3 号、放射率 0.94)を溶接ビード部を避けて塗布する前準備を行っている。放射温度計カメラは日本アビオニクス社製 R500EX-P を用いた。溶接時のアークを直接見ないようにカメラを配置し、溶接工程およそ数分間を 10Hz の繰り返しでサーモグラフィ画像データを取得保存し、その後オフラインで温度分布を分析した。

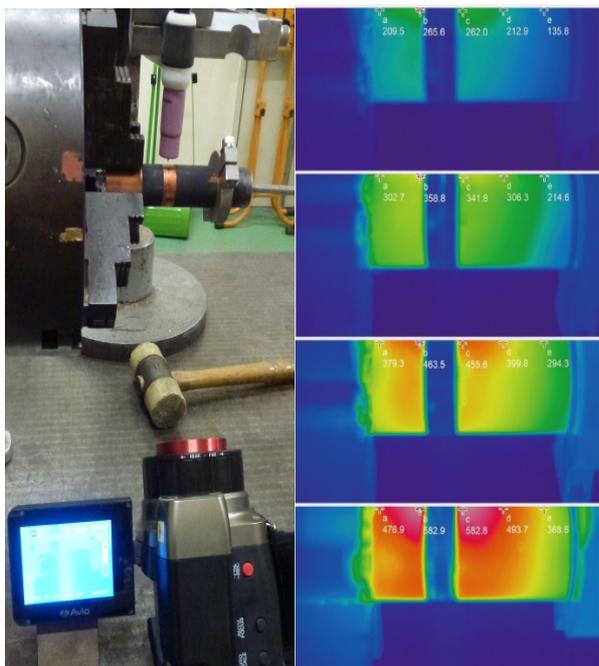


Figure 7: The radiation thermometer setup (left) and the thermographic image during welding. Images from the top, during preliminary heating, at the start of actual welding, at the first lap of actual welding, and at the end of the welding process.

前述の溶接のセットアップでは、アーク発生部から約15mmの位置の温度が本溶接前の予備加熱でおよそ350°C程度、本溶接1週目で約450°C程度になっている。溶接終了段階においておよそ500~550°C程度で表面および内面共に良好なTIG溶接接合が得られ、それ以上では深く溶けすぎて内側に溶接ビードが盛り上がるまたは溶け落ちて穴が開く状態となった。今回のセットアップでは溶接終了時の温度が管のほぼ全体で軟化温度の350°Cを超えることが判明した。さらに、溶接時に管を固定支持するチャック固定側の管の温度がアルゴンガスを供給する側よりも温度分布が高くなる傾向があり、チャック部への熱伝導で熱が逃げる以上にアルゴンガスの流れの影響による熱流入が大きい可能性があることがわかった。管内部に流す不活性ガスの流量も溶接の温度管理の上で注意が必要と考えられる。

2.6 ICF70 フランジ付き AgOFC 管突合せ溶接

AgOFC 管の TIG 溶接条件が分かったところで、TIG 溶接部を含む試験ダクトを製作し、超高真空の生成に問題が無いかを確かめる実験を行った。試験ダクトは市販のステンレス製 ICF70 フランジに AgOFC 管(外径 28mm、内径 25mm、長さ 50mm)を電子ビーム溶接で接合したものを4つ準備し、2つを管部で TIG 溶接を行った。

1 本目の試験は前回最後に行った試験(AgOFC, L=50mm)と同条件で行った。結果、盛り上がりは 0.3mm 以上の大きい裏波ビードとなった。前回の試験では管端にアルミ製のアルゴン供給治具、排出側にはアルミホイルを詰めていたのに対し、電子ビーム溶接された SUS 製の ICF70 フランジに変わったことで熱伝導が変わり、熱が逃げづらくなったためと思われる。2 本目の試験は溶

接電流を 155A から 150A にパルス電流を 45A から 40A に小さくした結果、盛り上がりは 0.3mm 以下に収まり良好な裏波ビードを得られる事が出来た。

3. 真空試験

真空試験を行う前に脱脂洗浄としてアセトンおよびソルミックス(エタノールとメタノールの混合液)で管内部に対して約5分の超音波洗浄を行い、その後に超純水の流水で内部を洗い流して乾燥させた。この2セットの短い試験ダクトをつなげて排気装置に接続し、超高真空生成のためにベーキングを実施した。真空試験を行った時のダクト部の写真および真空システムの概要図を Figure 8 に示す。試験中の真空は電離真空計(キャンノンアネルバ社製 M-336MX)、残留ガス分析は四重極質量分析器(インフィコン社製 Transpector2 H100M)を用いて計測を行った。ベーキング時の管部温度は NEG コーティングを十分活性化できる 250°C以上となるようヒーターを設置し、約 270°Cで 24 時間保持した。真空試験時の残留ガス分析結果を Figure 9 に示す。

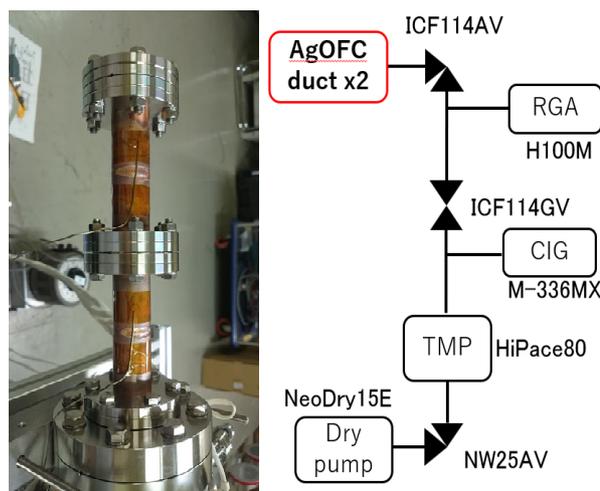


Figure 8: A photograph of the two AgOFC ducts at the time of vacuum test (left) and a schematic view of the rough pumping system used at the vacuum test (right).

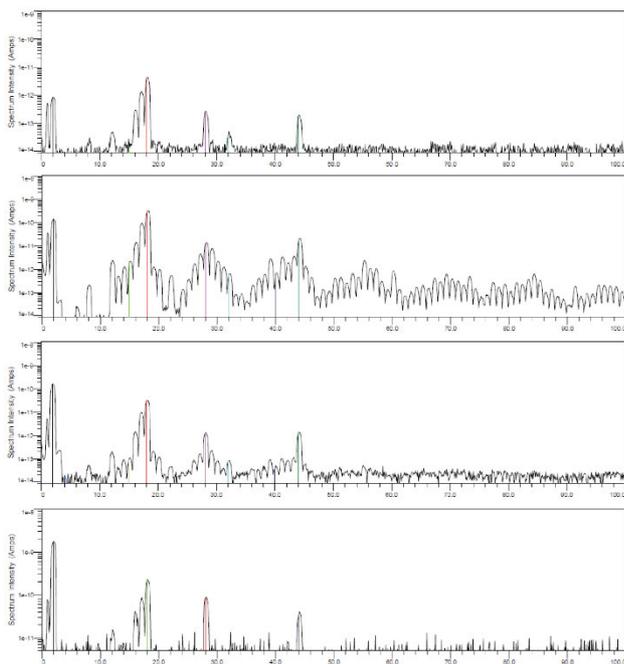


Figure 9: Results of RGA spectrum during baking test. Before baking, at the beginning of baking, at the end of baking, after baking, respectively from the top row in order.

ベーキング前の圧力 $2.0E-6$ Pa 時の残留ガスは一般的な超高真空装置の大気開放後のスペクトルと同等であり、異常な放出ガスは無く、ベーキング時の初期には炭化水素系のガスが多少放出されるものの、ベーキング終盤にはそれらも十分低くなり、常温に戻った状態では圧力は $1.6E-7$ Pa となって一般的な超高真空の残留ガススペクトルが得られている。(やや水の分圧が高い理由は装置に隔膜真空計など高温でベーキングできないシステムを含むためと推測している。)

試験の前後で He によるリークテストを実施し、使用したリークディテクタのバックグラウンドレベル ($5E-11$ Pa m^3/s) でリークは検出されなかった。最後にヒートサイクル試験を行った。約 $250^{\circ}C$ までの加熱と冷却を 10 回繰り返し、溶接箇所、フランジともにリークの発生はバックグラウンドレベル ($1.5E-11$ Pa m^3/s) で検出されなかった。今回実施した AgOFC 管の TIG 溶接は十分超高真空仕様に耐えることを確認した。

まとめ

リン脱酸銅および AgOFC 管の TIG 溶接を様々な条件で行い、良好な溶接が得られる条件を割り出し、再現性良く良好な溶接が実現できることを示した。そして、超高真空試験を行うための AgOFC 管同士の接合部に TIG 溶接を用いた短ダクトを製作し、ベーキングおよび残留ガス分析を行い、その結果から超高真空生成に適した接合であることを確認した。

溶接部の熱容量、温度の境界条件が異なると良好な TIG 溶接が行える条件も変わってしまうため、今後は溶接部周りに水冷式の治具を付けるなど温度の境界条件を固定、かつ軟化温度を超える領域を最小限化し、様々な形状の銅製ダクトの管部溶接に対し安定した TIG 溶

接が行える工夫が不可避と考えている。

謝辞

今回の AgOFC 管の TIG 溶接を試みるきっかけとなった CERN の NEG コーティング用 AgOFC ダクト製作工程に関して CERN 真空グループ Pedro Costa Pinto 博士より溶接時の動画など多くの情報を提供頂きました。放射温度計による TIG 溶接時の温度計測について日本アビオニクス株式会社の小新井あき氏、松井基臣氏のご協力をいただきました。この場をおかりして感謝申し上げます。

参考文献

- [1] KEK 放射光 CDR;
http://www2.kek.jp/imss/notice/assets/2016/10/31/KEK_S_CDR_161031.pdf