

Supraleitende Stromschienen für die Hochstrom-Elektrolyse

Claus Hanebeck^{1*}, Stefan Huwer¹, Carsten Räch¹, Wolfgang Reiser¹

¹ Vision Electric Super Conductors GmbH, Morlauerer Str. 21, 67657 Kaiserslautern, Deutschland
hanebeck@vesc-superbar.de

* Korrespondenzautor

Kurzfassung

Der Einsatz von Hochtemperatur-Supraleitern (HTSL) bietet große Vorteile insbesondere in Hochstrom-Gleichstrom-Anwendungen. Hier sind Elektrolysen, Aluminiumhütten oder die Stromversorgung großer Rechenzentren zu nennen mit Strömen von bis zu 200 kA und sogar darüber auf Entfernungen von 100 m oder mehr. Verglichen mit herkömmlichen Leitern kann der erforderliche Querschnitt auch unter Berücksichtigung des Kryostaten massiv reduziert werden. Vorteile zeigen sich nicht nur im Verschwinden der ohmschen Verluste sondern auch hinsichtlich Platzbedarf, Gewicht und Montage.

Im Rahmen des öffentlich geförderten 3S-Projekts haben wir eine supraleitende Stromschiene für 20 kA basierend auf YBCO-Bändern entwickelt. Das System ist modular aufgebaut und besteht aus geraden und abgewinkelten supraleitenden Elementen, die in einem festen Rohr-Kryostat werksseitig vorgefertigt und geprüft werden. Diese Elemente können leicht transportiert werden, sind robust und werden vor Ort auf einfache und sichere Weise mit einer extrem niederohmigen Kupplung miteinander verbunden.

Die Stromschiene wird mit unterkühltem flüssigem Stickstoff zwischen 65 und 70 K gekühlt, der von einer Kryoflüssigkeitspumpe zirkuliert wird. Die Unterkühlung verhindert zum einen die Gasbildung in der Schiene und reduziert zum anderen den Bedarf an Hochtemperatur-Supraleitern. Die benötigte Menge an Supraleitern wird durch eine Abstandserhöhung zwischen den einzelnen Supraleiterbändern noch weiter verringert.

Die Stromeinkopplung erfolgt über zwei neuartige mehrstufig gekühlte Stromzuführungen an den Enden. Gekühlt wird das komplette System in einem geschlossenen Kreislauf ohne abdampfendes Kryogen nach dem initialen Einkühlen. Das ist besonders im industriellen Bereich ein großer Vorteil.

Ein 25 m langer Demonstrator wurde in einer Chlorfabrik bei BASF in Ludwigshafen im realen industriellen Umfeld installiert und erfolgreich eingekühlt.

Stichwörter:

Kryotechnik, Hochtemperatur-Supraleitung, Stromzuführung, Stromschiene

1 Einleitung

Sehr hohe Gleichströme bis zu 500 kA werden vor allem in der Industrie für die Chlor- und Kupferelektrolyse, die Aluminiumherstellung aber auch in Rechenzentren gebraucht [1]. Der Einsatz von Hochtemperatursupraleitern (HTSL) hat besonders für diese Anwendungen große Vorteile. Verglichen mit konventionellen Leitern aus Kupfer oder Aluminium kann der Platzbedarf um bis zu einer Größenordnung reduziert werden. Dazu kommen die entfallenden ohmschen Verluste, weniger Materialverbrauch und geringeres Gewicht sowie höhere Flexibilität am Installationsort.

Im vom BMWi geförderten Projekt SupraStromSchiene (kurz 3S) haben sich die Partner Vision Electric Super Conductors, Karlsruher Institut für Technologie und das Institut für Luft- und Kältetechnik zusammenschlossen, um einen Prototyp für 20 kA Gleichstrom mit einer Länge von 25 m zu entwickeln. Dieser Prototyp wurde in einer industriellen Chlorelektrolyse installiert und in Betrieb genommen.

2 Hauptteil

Die 20 kA Stromschiene, die in einer Chlorelektrolyse bei der BASF in Ludwigshafen installiert und in Betrieb genommen wurde, besteht aus zwei Hauptkomponenten. Zwei identischen Stromzuführungen an den Enden und der 25 m langen supraleitenden Stromschiene dazwischen. Abb. 1 zeigt ein Schema des Prototyps. Die Kühlung der Stromschiene und der Stromzuführungen erfolgt separat. Die Stromzuführungen teilen sich lediglich die Kältemaschine für die erste Stufe. Zur Rückkühlung der Kältekompressoren wird Flusswasser aus dem Rhein eingesetzt.

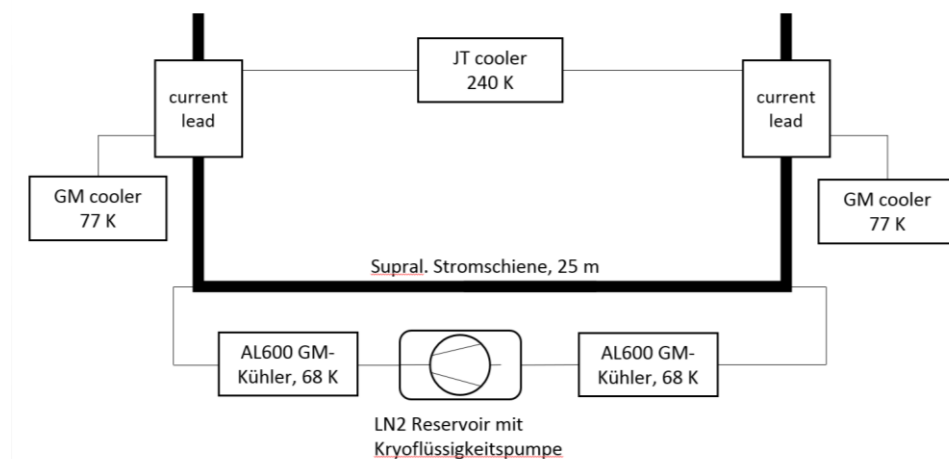


Abb. 1 Schema des 3S-Systems

2.1 Stromschiene

Im Gegensatz zu Kabeln bestehen Stromschienen aus diskreten Elementen. Beliebige vertikale und horizontale Winkel können realisiert werden. Ein Vorteil dieser Technik ist die einfache Installation besonders in Industrieanlagen mit begrenztem Platzangebot.

Das Layout der Stromschiene hat einen Nennstrom von 20 kA. Als Supraleiter kommen Standard 2G-YBCO-Bänder von zwei verschiedenen Herstellern mit 12 mm bzw. 10 mm Breite zum Einsatz. Die eingesetzten Bänder haben ein Mindest- I_c von 450 A bei 77 K im Eigenfeld.

Im Gegensatz zum Supraleitereinsatz bei Magnetanwendungen liegt bei supraleitenden Stromschienen das Hauptaugenmerk nicht auf der Stromdichte sondern auf der absoluten Stromtragfähigkeit. Um den Bedarf an Supraleitern zu reduzieren werden die HTSL-Bänder deshalb mit Kupfer-Wellbändern auf Abstand gehalten und auf zwei Stapel aufgeteilt (siehe Abb. 2). Der Einfluss des Magnetfelds wird durch diese Anordnung geringer, was zu einer Ersparnis an Supraleitermaterial von bis zu 50% führt. Die höheren Kryostatkosten aufgrund des größeren Querschnitts werden durch die Einsparungen beim Supraleiter mehr als kompensiert.

Um die Stromtragfähigkeit der Bänder darüber hinaus zu erhöhen, wird die Stromschiene mit unterkühltem Stickstoff bei 68 K bis 70 K gekühlt.

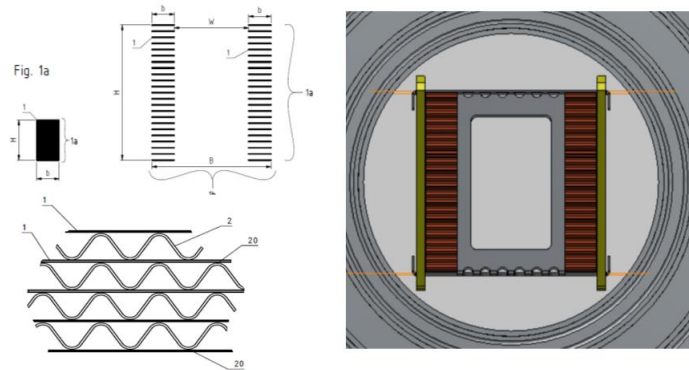


Abb. 2 Querschnitt der Stromschiene

Die Stromschiene hat einen Außendurchmesser von 150 mm. Die Elemente werden im Werk vorgefertigt. Auf der Baustelle beim Kunden werden die Elemente zunächst elektrisch verbunden und anschließend wird der vakuumisolierte Kryostat verschweißt.

Die für dieses Projekt neu entwickelte elektrische Verbindung hat einen sehr niedrigen Widerstand von unter 1 nΩ. Erreicht wird dieser durch eine neuartige Kammstruktur, die es erlaubt alle Bänder „face-to-face“ zu verlöten.

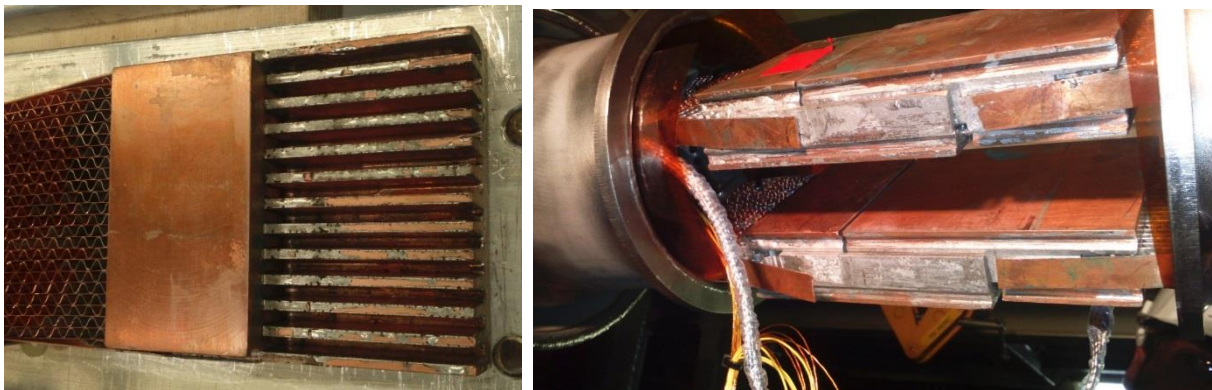


Abb. 3 Links: Vorbereiteter elektrischer Lötkontakt, rechts: verlötet

Die Stromschiene des 3S-Systems besteht aus 5 Schienenelementen und 2 Einspeiseelementen. Von den insgesamt 7 Elementen besitzen 5 entweder einen horizontalen oder einen vertikalen Winkel (siehe Abb. 4).

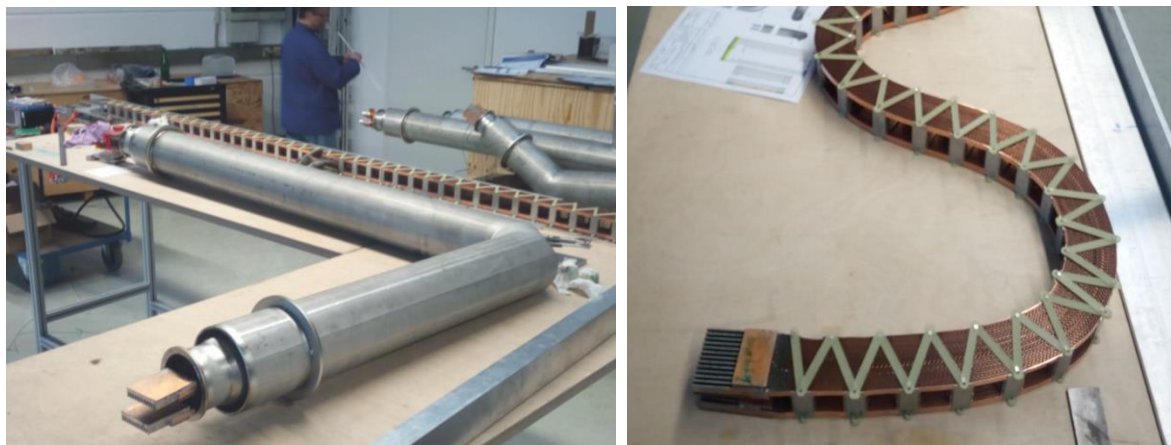


Abb. 4 Links: Winkelement, rechts: Wellenform

Um die thermische Kontraktion bei der Abkühlung auszugleichen, werden die Supraleiter in der Stromschiene wellenförmig verlegt.

2.2 Kühlung der Stromschiene

Die supraleitenden Bänder in der Stromschiene werden mit unterkühltem flüssigen Stickstoff bei einer Temperatur zwischen 68 K und 70 K in einem geschlossenen Kreislauf gekühlt. Der unterkühlte Stickstoff wird von zwei Cryomech AL600 GM-Kühlern erzeugt, die zusammen etwa 600 W Kälteleistung bei 68 K bereitstellen. Um einen guten Wärmeübergang zu erreichen, ist an die Kalköpfe jeweils ein Wärmetauscher aus Kupfer angeschraubt. Der Kreislaufstrom wird von einer speziellen vom ILK Dresden entwickelten Kryoflüssigkeitspumpe [3] aufrechterhalten.

Ein GM-Kühler ist mit seinem Wärmetauscher vor der Kreislaufpumpe angeordnet und der zweite dahinter (siehe Abb. 1). Der Volumenstrom beträgt etwa 450 l/h, d. h. der Stickstoff in der Stromschiene wird in einer Stunde mehr als zweimal komplett umgewälzt.



Abb. 5 Kryoflüssigkeitspumpe (ILK Dresden)

2.3 Stromzuführung

Weil der Großteil der Verluste eines supraleitenden Stromschiensystems in den Stromzuführungen anfällt, haben wir eine neuartige mehrstufige Stromzuführung [4] entwickelt. Länge und Querschnitt der Abschnitte des Kupferpfads wurden mit Hilfe einer 1D-Simulation für 20 kA optimiert. Mehrstufige Stromzuführungen wurden schon vorher untersucht [5], aber soweit wir wissen noch nicht für einen solch hohen Strom.

Der warme Kupfer-Anschluss der Stromzuführung wird mit normalem Kühlwasser gekühlt. Unterhalb dieses Temperaturlevels sind drei Kältemaschinen angeschlossen, die auf unterschiedlichen Kühlprinzipien beruhen.

Die erste Stufe wird von einer Standard Joule-Thompson (JT)-Kältemaschine auf 240 K gekühlt. Solche Maschinen werden standardmäßig zum Tiefkühlen in der Lebensmittelindustrie verwendet. Die zweite Stufe wird von einer Gemisch-Kältemaschine auf etwa 150 K gekühlt. Diese Maschinen werden hauptsächlich als Kryopumpe nach dem Prinzip der Meissner-Falle z. B. in Vakuum-Beschichtungsprozessen genutzt. Am Kupfer-Supraleiter-Übergang sind die supraleitenden Bänder auf T-förmige Lamellen gelötet, die von flüssigem Stickstoff bei Atmosphärendruck gekühlt sind. Der verdampfende Stickstoff wird von einem einstufigen Gifford-McMahon (GM)-Kühler bei 77 K vollständig rekondensiert. Weil der GM-Kühler überschüssige Kälteleistung bereitstellt und der Kühler nicht regelbar ist, wird der Druck von einem geregelten elektrischen Heizer im Stickstoffbad konstant gehalten.

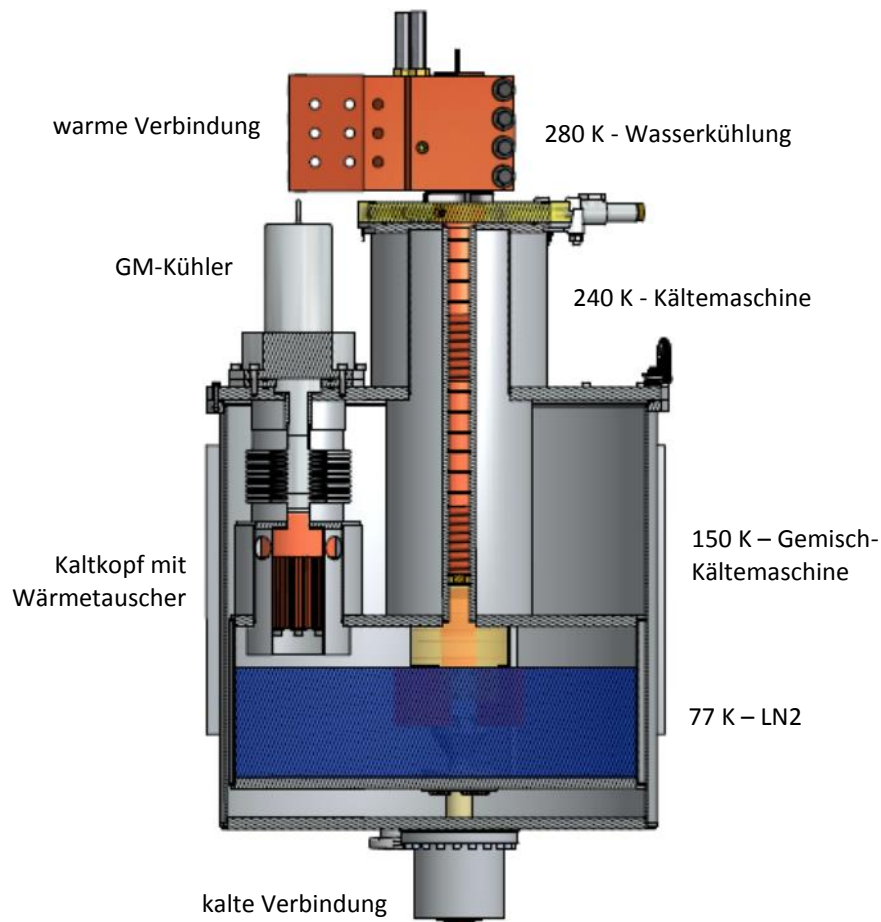


Abb. 6 Stromzuführung

Die Auswahlkriterien für die Kältemaschinen waren: Zuverlässig, preiswert, gute Verfügbarkeit am Markt sowie weltweiter Vertrieb und weltweite Wartung.

2.4 Inbetriebnahme

Für die Inbetriebnahme des Kühlsystems wird die Stromschiene zunächst mit flüssigem Stickstoff bei Atmosphärendruck in einem Zeitraum von 9 h von Raumtemperatur auf 80 K abgekühlt. Im Anschluss daran wird unterkühlter Stickstoff mit einer Temperatur von ca. 68 K in die Schiene eingefüllt, um die Stromschiene auf etwa 76 K abzukühlen. Der am anderen Ende austretende „warme“ Stickstoff wird in einem Dewar aufgefangen.

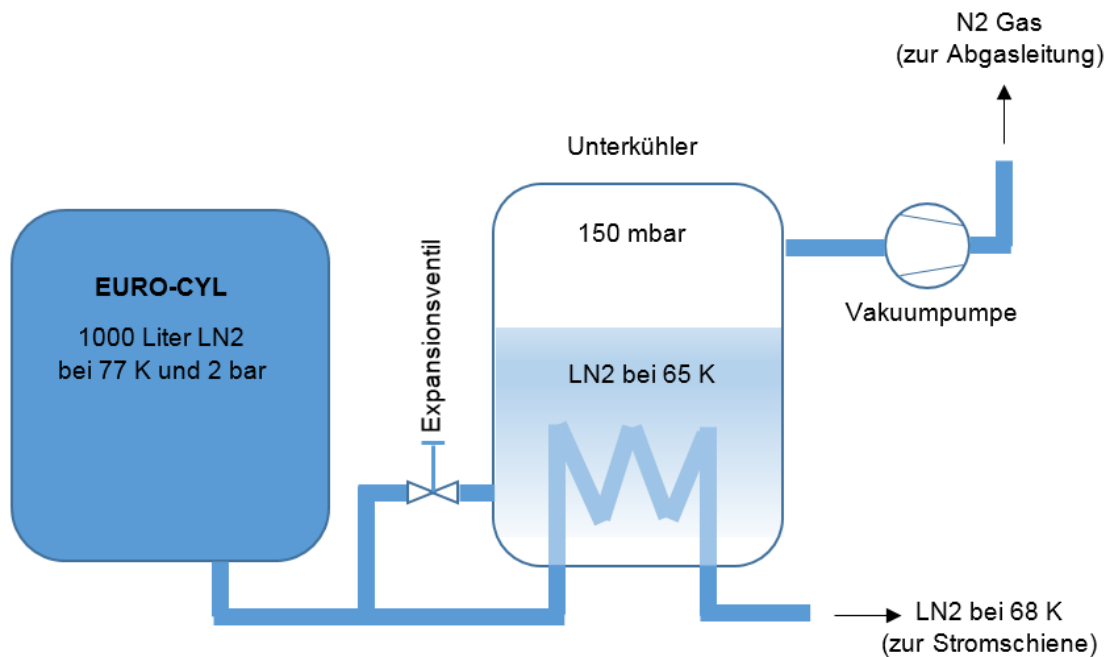


Abb. 7 Unterkühler und 1000 Liter Euro-Cyl-Dewar

Die Unterkühlung auf 68 K dauert 6 h und wird von den beiden GM-Kühlern übernommen. Die Volumenabnahme des Stickstoffs in Folge der Abkühlung wird durch zweimaliges kurzes Nachspeisen von unterkühltem Stickstoff ausgeglichen. Für den Dauerbetrieb werden weder der Unterkühler noch das 1000 Liter Stickstoff-Dewar benötigt.

3 Zusammenfassung

Mit dem erfolgreichen Einkühlen der Stromschiene und der beiden Stromzuführungen sowie dem Unterkühlen der Stromschiene wurde ein wesentlicher Meilenstein des Projekts erreicht. Sowohl die beiden Stromzuführungen als auch die Stromschiene erreichen Stickstoff-Nullverbrauch. Diese Eigenschaft ist besonders im industriellen Umfeld unerlässlich, weil es in vielen technischen Anlagen nicht erlaubt ist große Mengen Stickstoff zu verdampfen. In vielen Industriebetrieben ist zudem keine Flüssigstickstoff-Infrastruktur vorhanden.

Alle Kältesysteme laufen aktuell seit über einem Monat störungsfrei. Sobald die BASF Ende November die jährliche Revision abgeschlossen hat, werden wir bis zu 16 kA über den supraleitenden Pfad schicken.

4 Danksagung

Unser Dank gebührt Prof. Dr. Mathias Noe und seinem Team am Karlsruher Institut für Technologie für die maßgebliche Unterstützung beim Design der supraleitenden Stromschiene. Bei Moritz Kuhn und dem Team am Institut für Luft- und Kältetechnik in Dresden möchten wir uns für die intensive Mithilfe bei der Entwicklung der Stromschielenkühlung bedanken. Florian Schreiner, Dr. Bernd Gutheil und die Technische Universität Kaiserslautern haben uns bei der Entwicklung der Stromzuführungen unterstützt.

Das 3S-Projekt wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie über den Projektträger Jülich gefördert (Fördernummer: 03ET1294). Die Stromzuführung als Hauptkomponente wurde separat von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AIF) gefördert (Fördernummer: KF2367206RR3). Auch an dieser Stelle vielen Dank für die Unterstützung und Förderung.

5 Nomenklatur

Formelzeichen

I_c Kritischer Strom (A)

6 Literaturverzeichnis

- [1] Morandi, A., HTS dc transmission and distribution: concepts, applications and benefits. *Superconductor Science and Technology* 28(12), 123001, 2015
- [2] Elschner, S.; Brand, J.; Goldacker, W.; Hollik, M.; Kudymow, A.; Strauss, S.; Zermeno, V.; Hanebeck, C.; Huwer, S.; Reiser, W.; Noe, M., 3S – Superconducting DC-Busbar for High Current Applications. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 28(4), 4800805, 2018
- [3] Binneberg, A.; Kaiser, G.; Klier, J., Pumpe für kryogene Flüssigkeiten. Deutsches Patent DE102008011456B4, 2008
- [4] Schreiner, F.; Gutheil, B.; Noe, M.; Reiser, W.; Huwer, S.; Hanebeck, C.; Räch, C.; Röhrenbeck, M.; Schreiner, F., Design and Manufacturing of a Multistage Cooled Current Lead for Superconducting High Current DC Busbars in Industrial Applications. *Proceedings of the Applied Superconductivity Conference (ASC 2016), Denver, USA, IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2016
- [5] Yamaguchi, S.; Emoto, M.; Yamamoto, N.; Sun, J.; Watanabe, H.; Hamabe, M.; Kawahara, T., Refrigeration Process to Realize a Multistage and Gas-Cooled Current Lead. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 23(3), 4802304, 2013