

超伝導マグネット用 極低温電力変換器の基礎研究

超伝導低温工学ユニット
力石浩孝

内容
超伝導コイル用電源の課題
極低温で動作する変換器
極低温用スイッチング素子の基礎検討
既存素子の評価

この研究課題の位置づけ

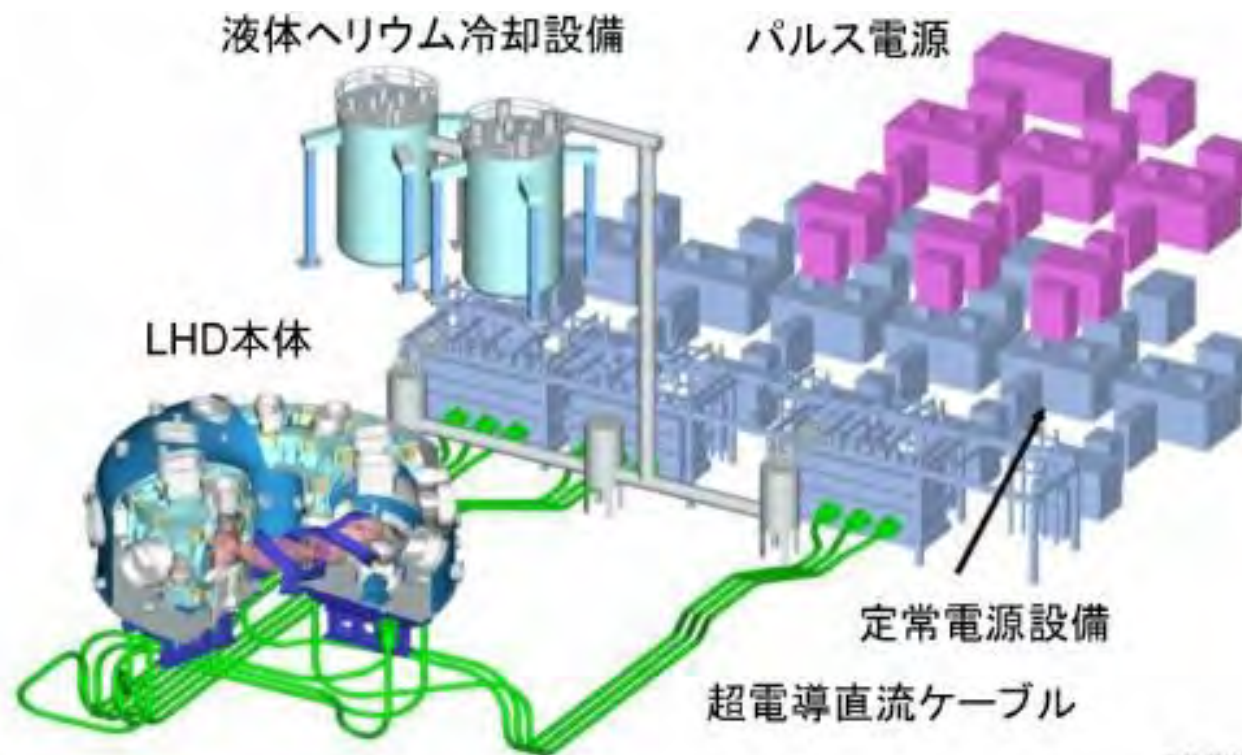
超伝導・低温工学ユニット 基礎研究から応用まで

Superconductivity & Cryogenics Unit From Fundamental Research to Applications



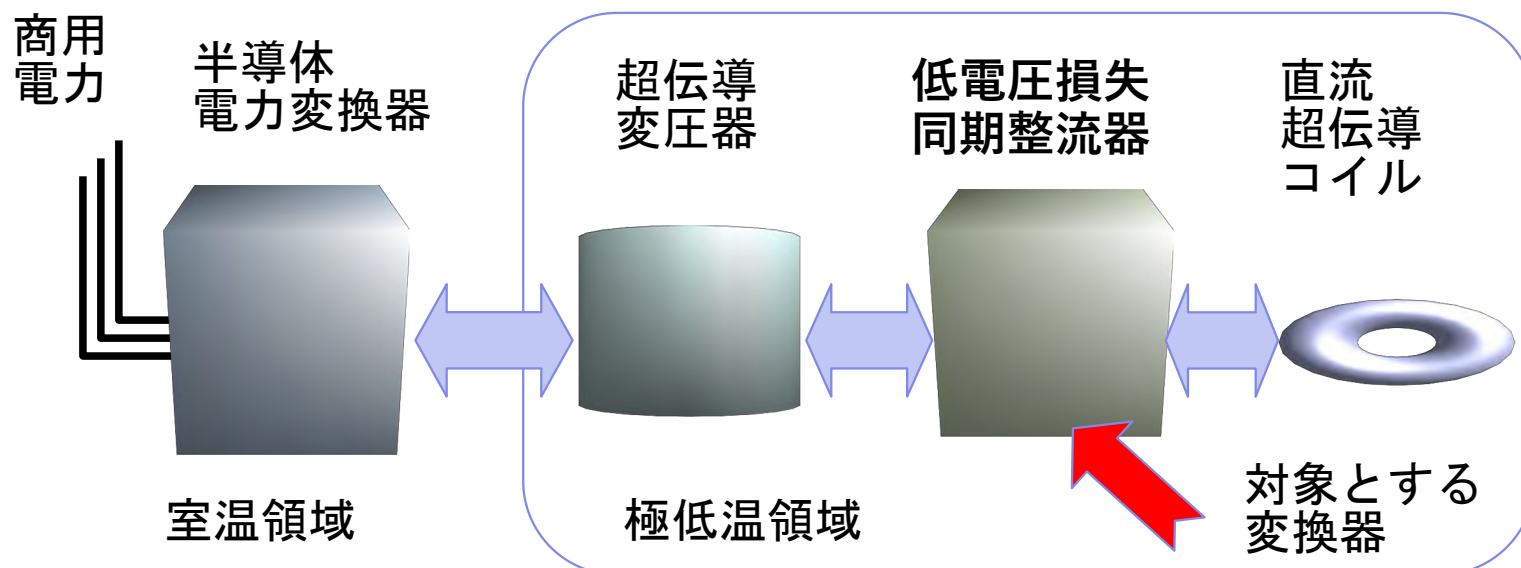
核融合装置用超伝導コイル電源の課題

- 炉本体よりも電源の占める空間が大きい
LHD の例：本体 1300m³, 定常コイル電源 1500m³
→ 実用炉では電源の小型化が必要
導体の電流密度（大電流で室温、銅だと 2A/mm² 程度）、冷却
- 大電流超伝導コイル負荷→大電流の電流リードが必要



電源の小型化→変換器を極低温に置く 極低温低温変換器

- 導体の電流密度向上→変換器本体を極低温下に置く
極低温で変圧→入力電流の低減、電流導入端子の小型化も可能
- 整流器の損失＝冷凍機負荷の増大→変換器の低損失化が必要
77K で使用すると、損失を 1/5 程度以下に下げたい
既設電源の損失概略：接続導体や巻き線で 6 割、整流素子で 4 割
導体を超伝導化し、整流素子損失を半減できれば可能
- 低温下での同期整流→整流に使うスイッチング素子？
超伝導 SW, 機械接点, 半導体スイッチ



極低温電力変換器の研究動向 超伝導機器用電源への適用

- 海外での検討事例：

Abdelrahman Elwakeel; Yuchuan Liao; Zihao Zao; Rafael Peña Alzola; Yudi Xiao; Min Zhang, “10 kW Cryogenic DC/DC Converter for Superconducting Propulsion Applications”, IEEE trans. on ASC, VOL. 36, NO. 5 など

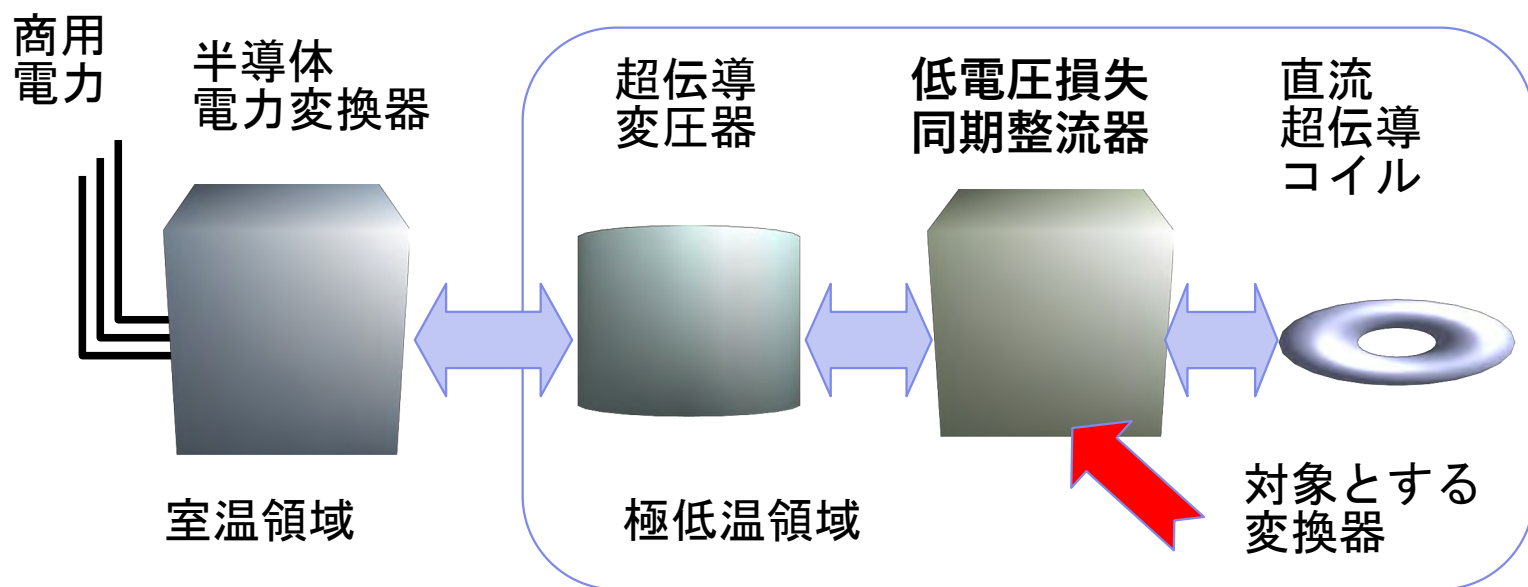
対象が超伝導電動機などであり、比較的高電圧
→今回対象としている低電圧電源とはスイッチング素子の様相が異なる

整流素子：スイッチング素子への要求事項

- a) オン抵抗、オン電圧が低く通電損失が小さい
- b) オフ時の抵抗が大
- c) ON/OFF の制御性が良い
- d) スwitching速度（ただし本用途では高速スイッチは不要）

素子の候補：超伝導 SW、機械接点、半導体 SW

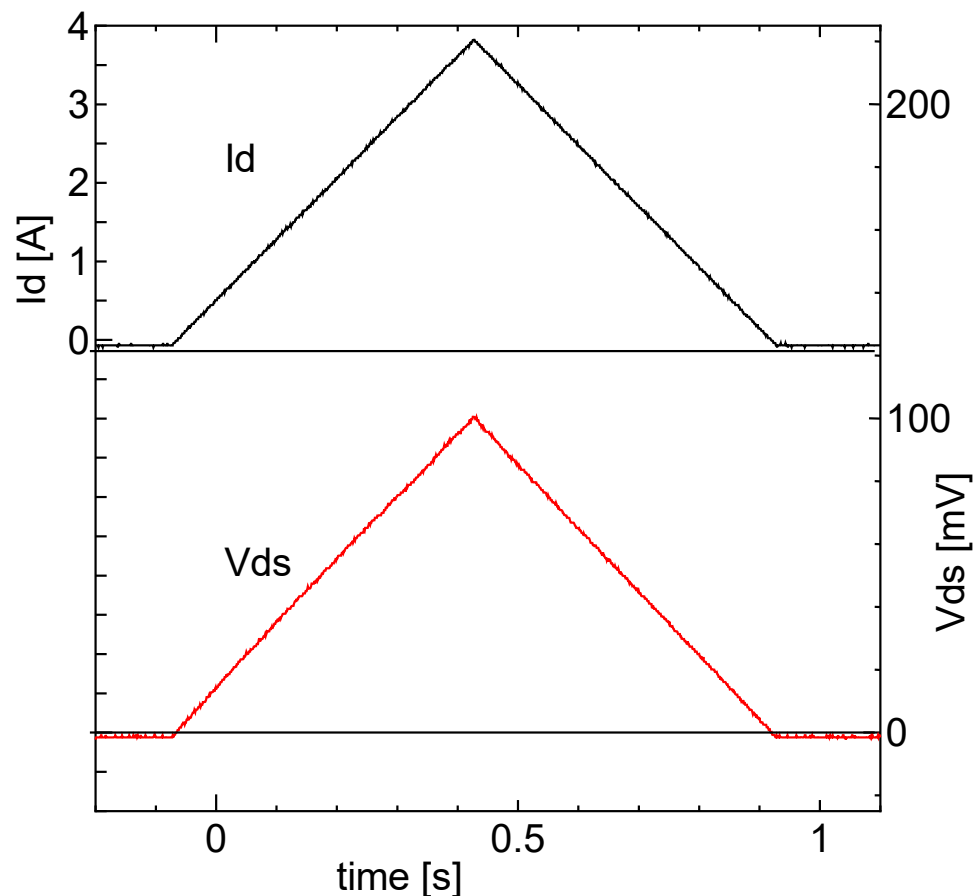
オフ抵抗、制御性からは半導体スイッチが良好→オン時の損失は？



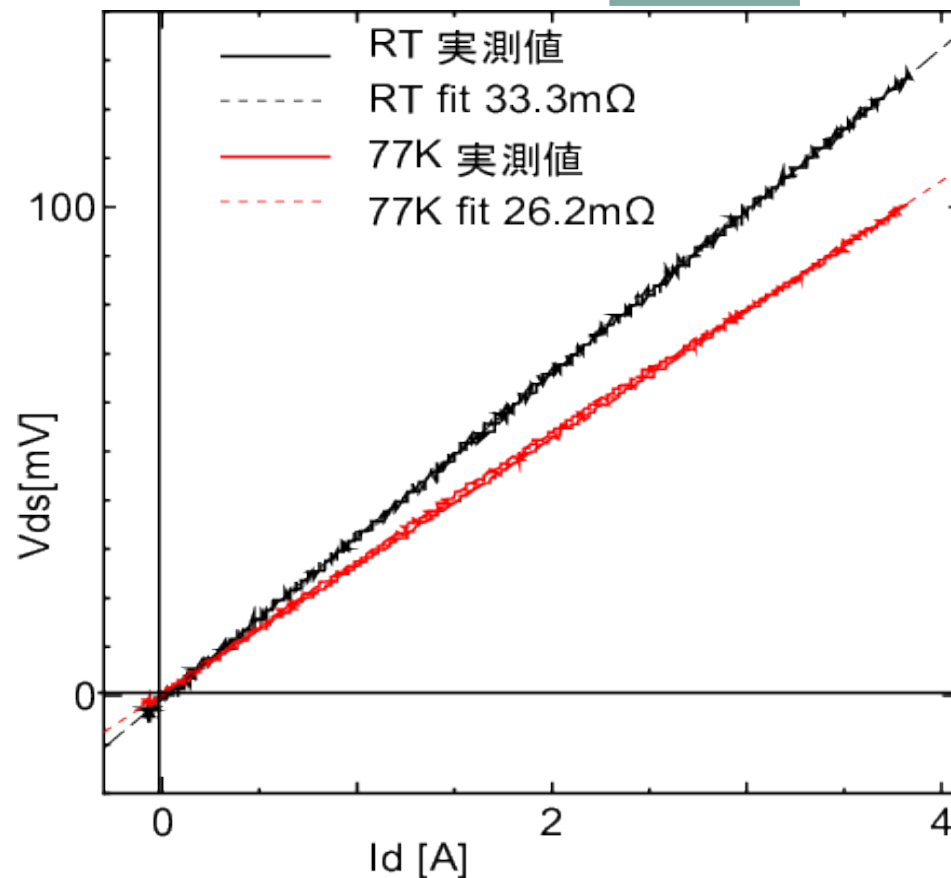
極低温下での半導体素子の損失評価 既存の半導体素子で極低温 (77K) でのオン抵抗を実測

- 通電損失：室温での 50% 以下が目安
- 測定方法
ゲートに既定の ON 電圧を加え、
ドレイン電流 I_d を三角波状に掃引、 V_{ds} を測定
- 発熱による影響を避けるため、
短時間での測定、ピーク電流は定格の 50% 程度
- 測定は室温大気中および液体窒素中
- 試料には、超伝導コイル用低電圧電源（定常時出力電圧は 0.1V 程度以下）を想定し、低定格電圧の Si-MOS 4 種、
GaN 2 種を選定（接合型素子、SiC 素子は除外）

測定結果例 (Si MOS FET)



FET on 抵抗の測定結果 (電圧電流波形)



FET V_{ds} - I_d 特性

測定範囲では直線性は良好、
ヒステリシスがない→チップ内温度上昇は抑えられている

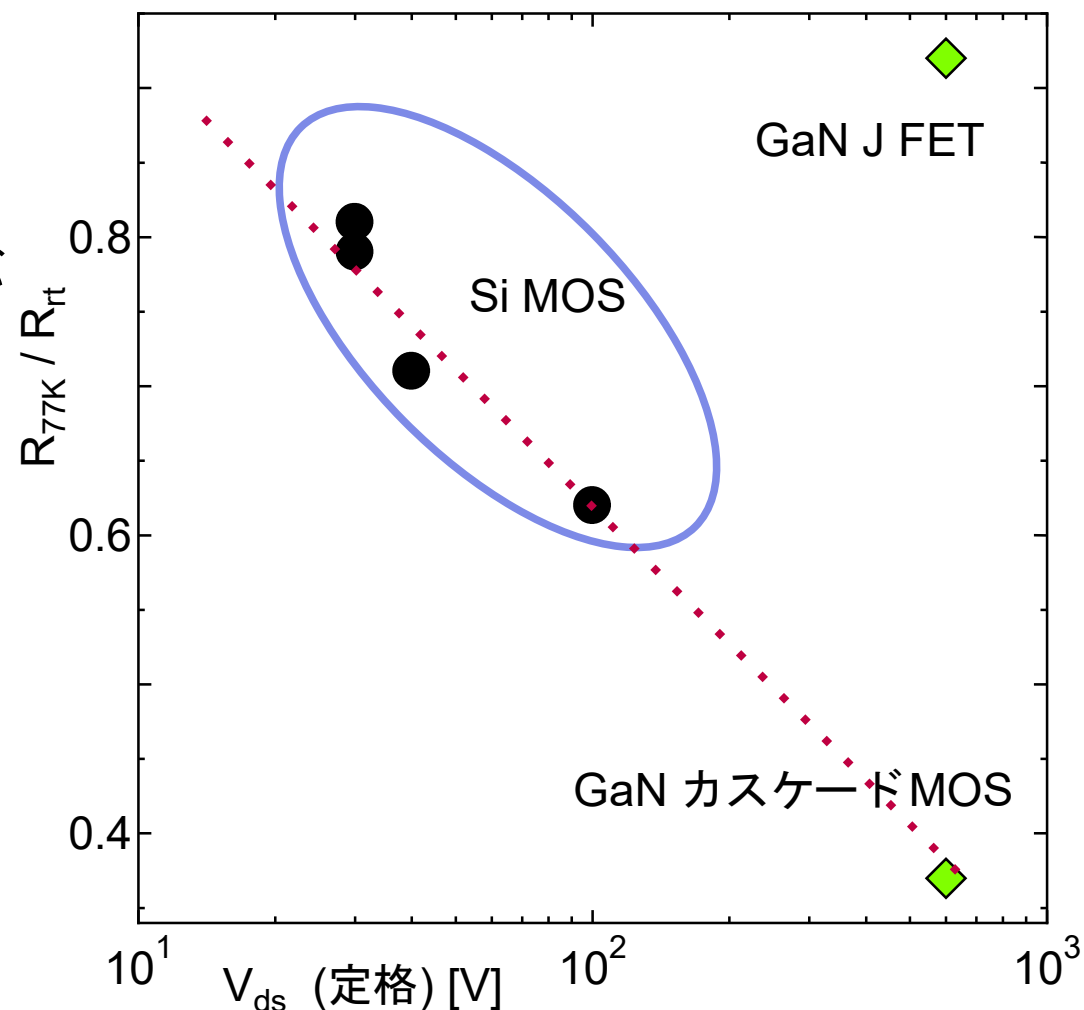
オン抵抗測定結果 - 素子定格電圧と冷却の効果

Si MOS

- 高耐圧の素子ほど冷却が効果的？
- 高耐圧素子：元の ON 抵抗が高く (100V 品で 30V 品の約 2 倍)、冷却の効果を相殺 → 低電圧大電流電源には不適

GaN

- サンプル数が少ない

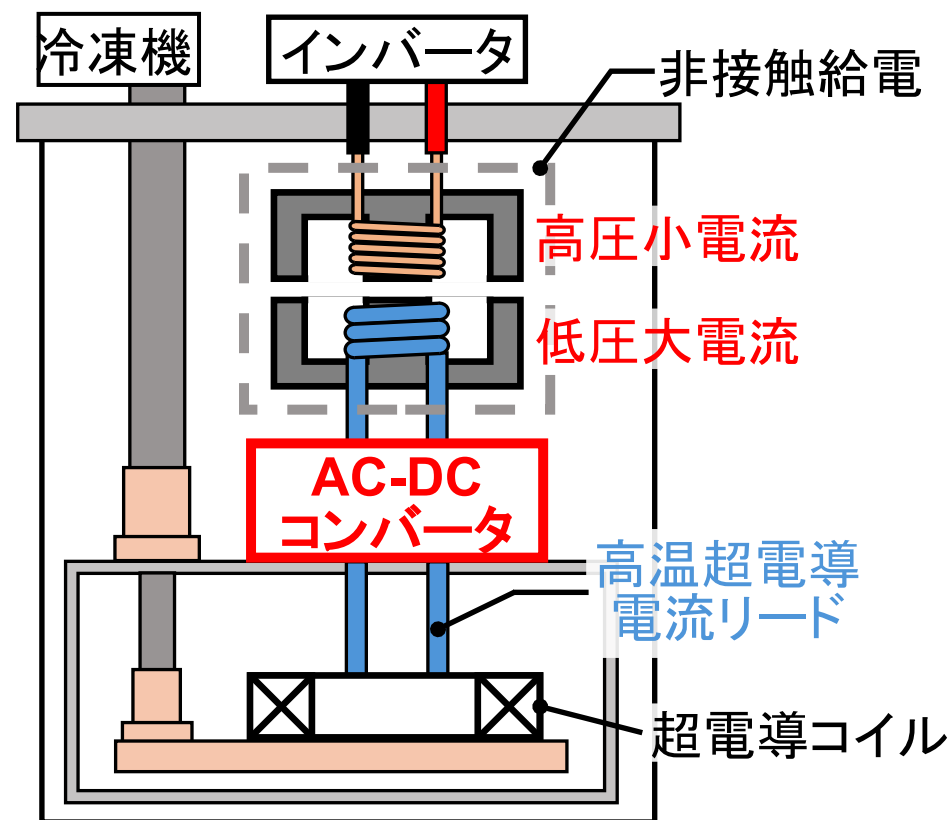


極低温変換器：明治大学との共同研究

電流リードを用いない
非接触給電（磁気結合）の検討

- 負荷は超伝導コイルを想定
→変換器は電流型
（直流部が定電流動作）
- スイッチング素子には
逆阻止動作が必要
サイリスタ、逆阻止 IGBT、
直列ダイオード、SW 素子の
逆直列接続等

非接触給電方式（提案手法）

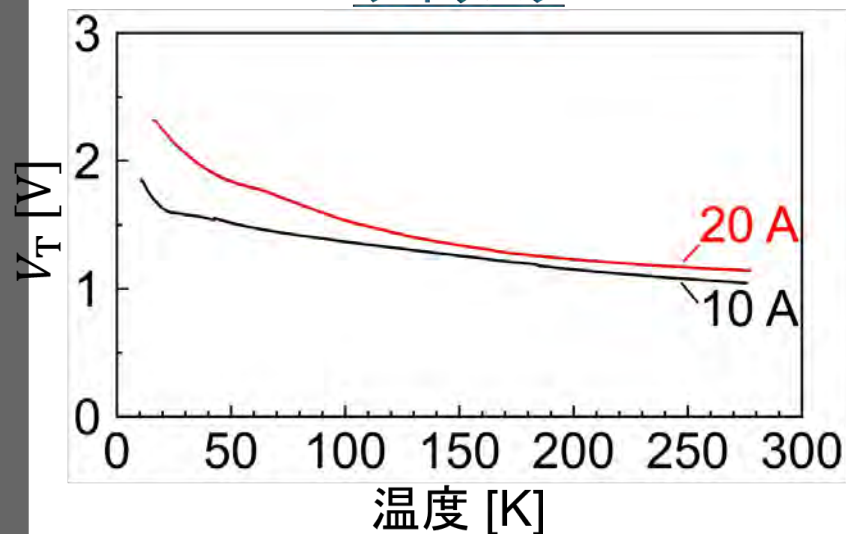


特性試験に使用した素子

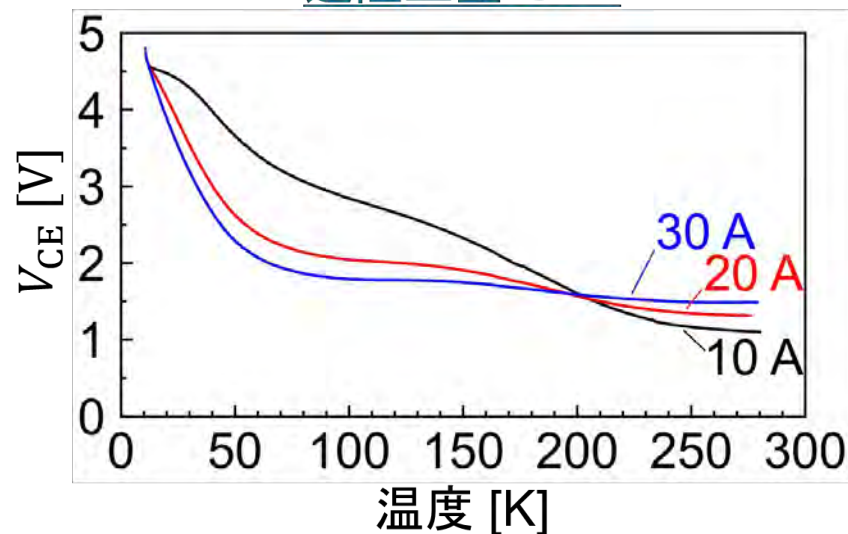
	型番	主な定格
SBD	RBQ30TB45BNZ	$V_R = 45 \text{ V}$ $I_o = 30 \text{ A}$
MOSFET	R6576KNZ4	$V_{DSS} = 650 \text{ V}$ $I_D = \pm 76 \text{ A}$
RB-IGBT	FGW85N60RB	$V_{CES} = 600 \text{ V}$ $I_C = 100 \text{ A}$
Thyristor	VS-30TPS08-M3	$V_{RRM} = 800 \text{ V}$ $I_{T(AV)} = 20 \text{ A}$

温度を変えて順方向電圧を評価

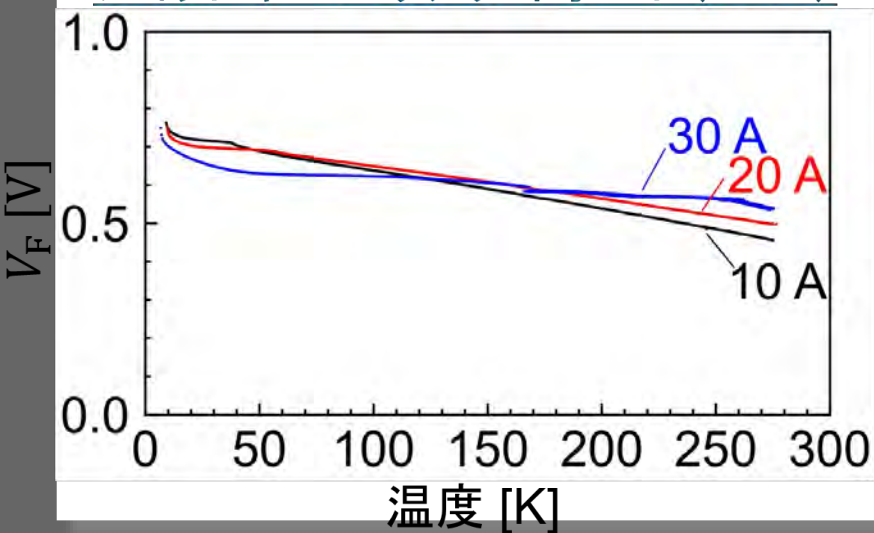
サイリスタ



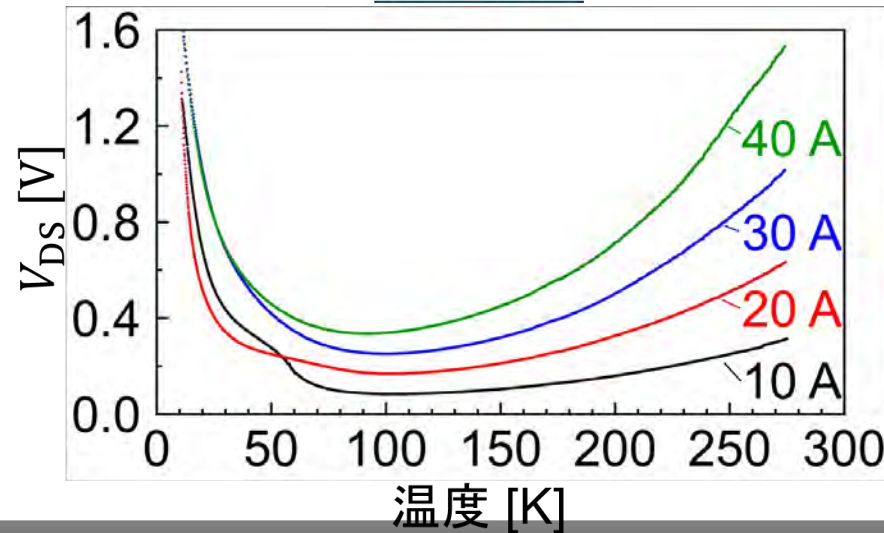
逆阻止型IGBT



ショットキーバリアダイオード(SBD)



MOSFET

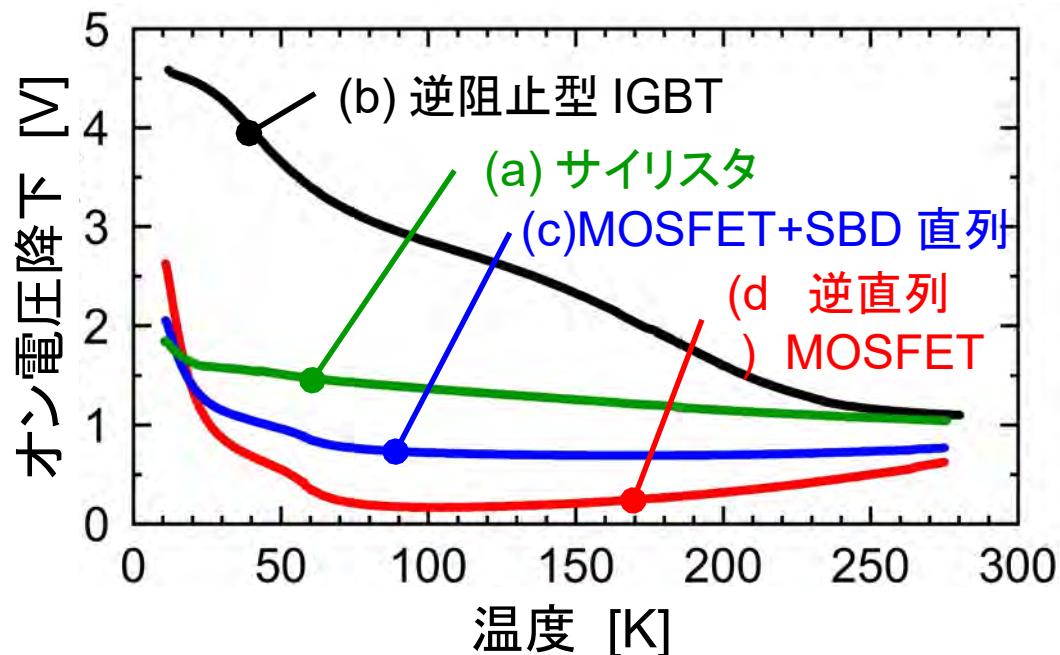


逆素子型スイッチング素子のオン電圧評価

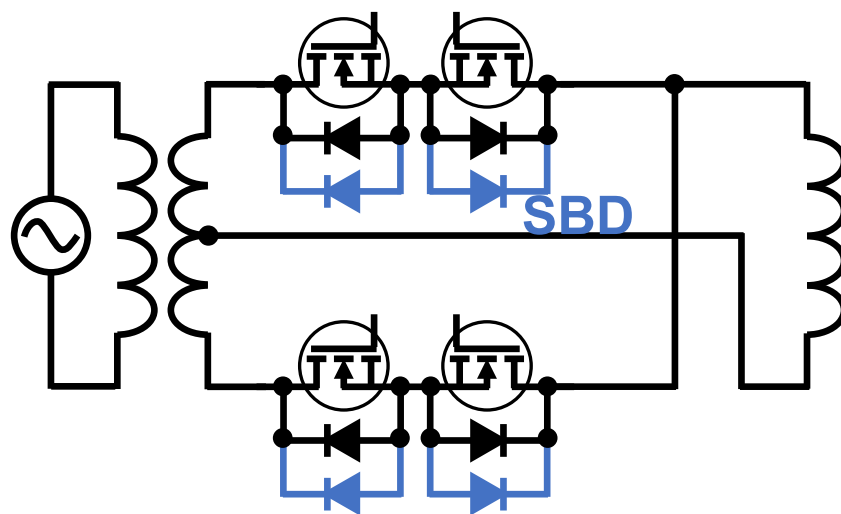
逆阻止のスイッチで ON 電圧を比較

MOS-FET を逆直列にして使用し、80-120K 付近で動作させるのがよい？

SW 素子候補の低温特性



極低温変換器の構成例



まとめ

- 超伝導コイル励磁電源の小型化を目指した極低温下で運用する電源の検討
- 極低温変換器で使用する整流素子
- 市販の半導体素子について通電損失の評価
 - 現状の素子では Si MOS-FET を 100K 前後で使用するのが妥当
 - RB IGBT、サイリスタ、SiC 素子は極低温使用は不適
 - ただし、冷却による通電損失の低減効果は不十分であり、より損失を低減する方策が必要