高温超電導 SQUID による地下観測と脱炭素社会

超電導センシング技術研究組合

超電導センサテクノロジー株式会社

波頭経裕

目次

１　SQUIDの基礎知識
（１）原理
（２）磁力計としてのシステム構成
（３）ノイズ
（４）感度と周波数帯域

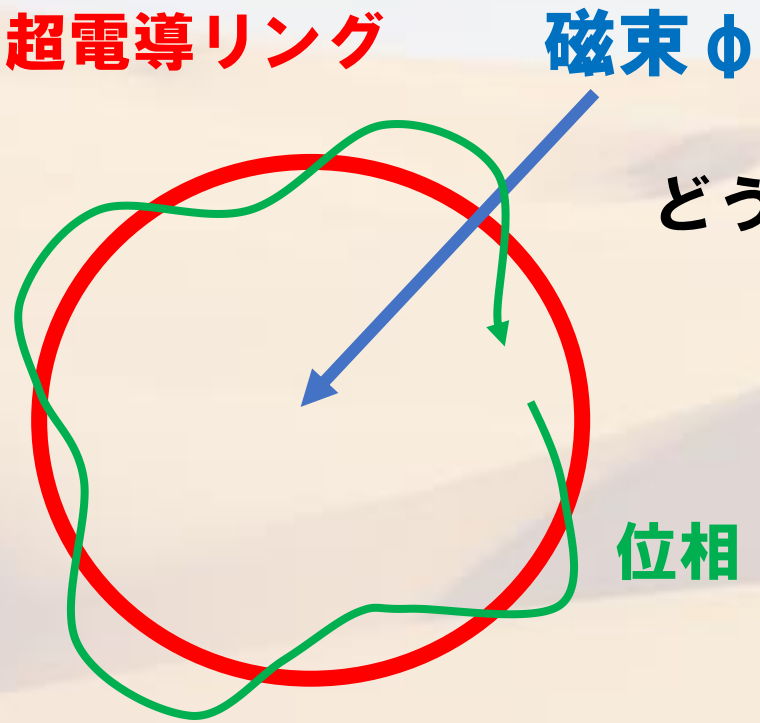
２　脱炭素社会の実現に必要な地下観測のニーズとSQUID

３　脱炭素社会に向けた応用
（１）地熱資源探査・モニタリングへの応用
（２）二酸化炭素地下貯留（CCUS）と油層の有効活用

４　今後の展開

1　SQUIDの基礎知識

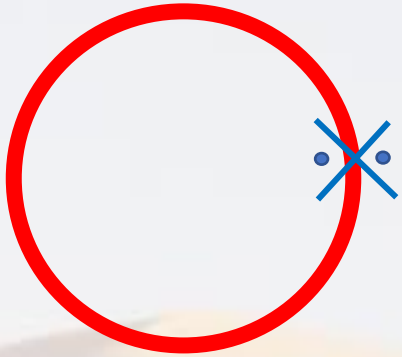
（１）原理



どう読み出すか

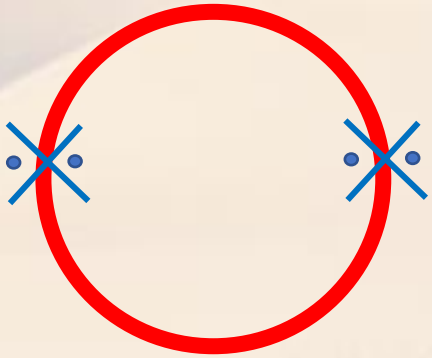
ジョセフソン
接合をつける

RF-SQUID



Φ_0周期で共振周波数が変わる
共振回路で読み出す
構造が簡単　感度は劣る

DC-SQUID

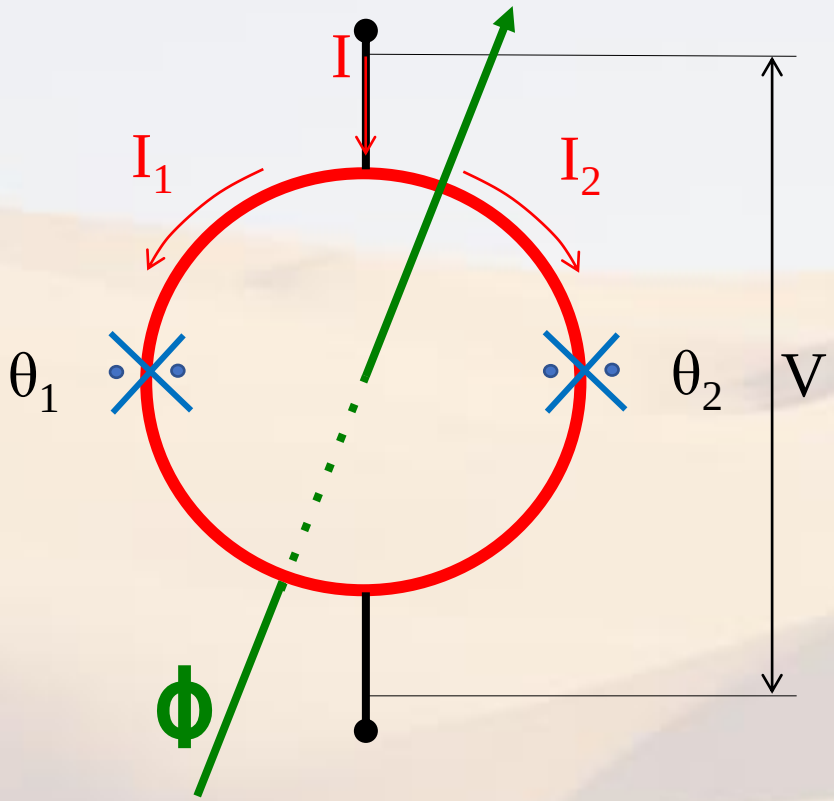


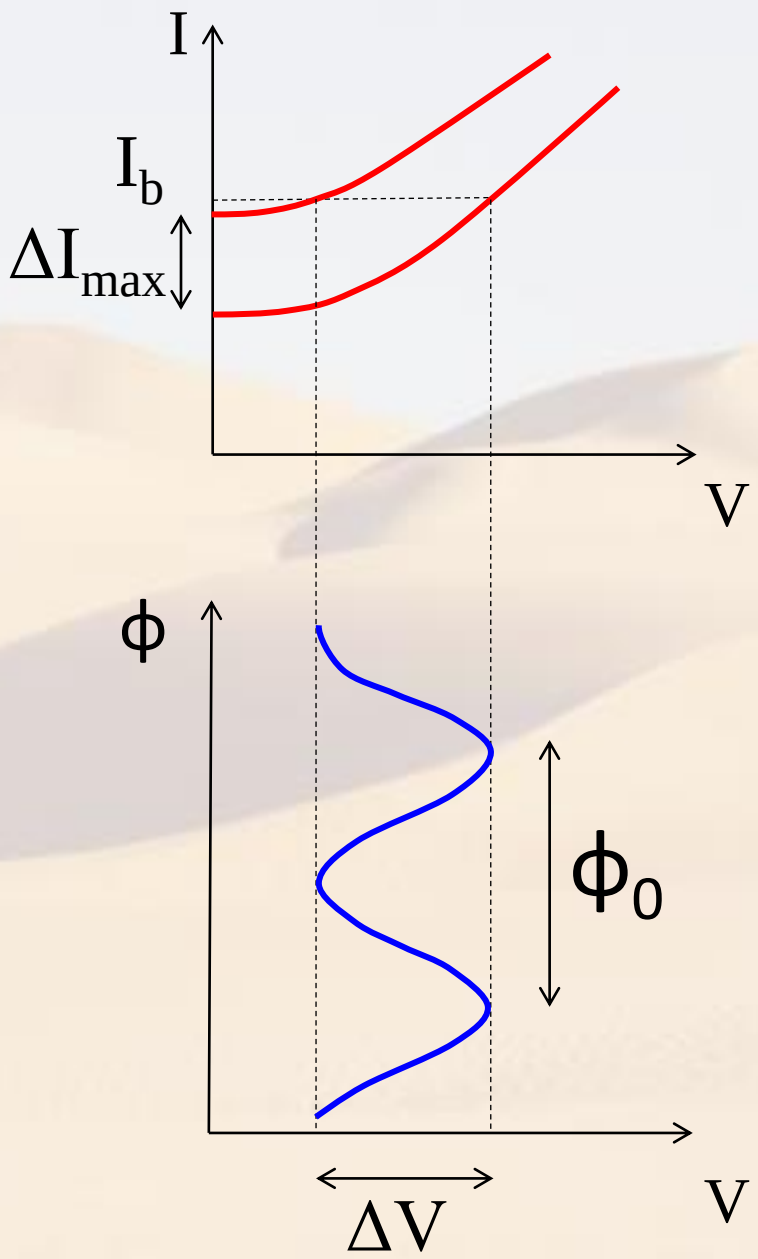
Φ_0周期で電圧が変わる
通常FLL回路による
電圧読み出しを行う

位相は連続でなければならない → ２πn

量子化された磁束ϕ_0（2.07×10^{-15} Wb）単位でしかリングには入れない

磁場と電圧の変化





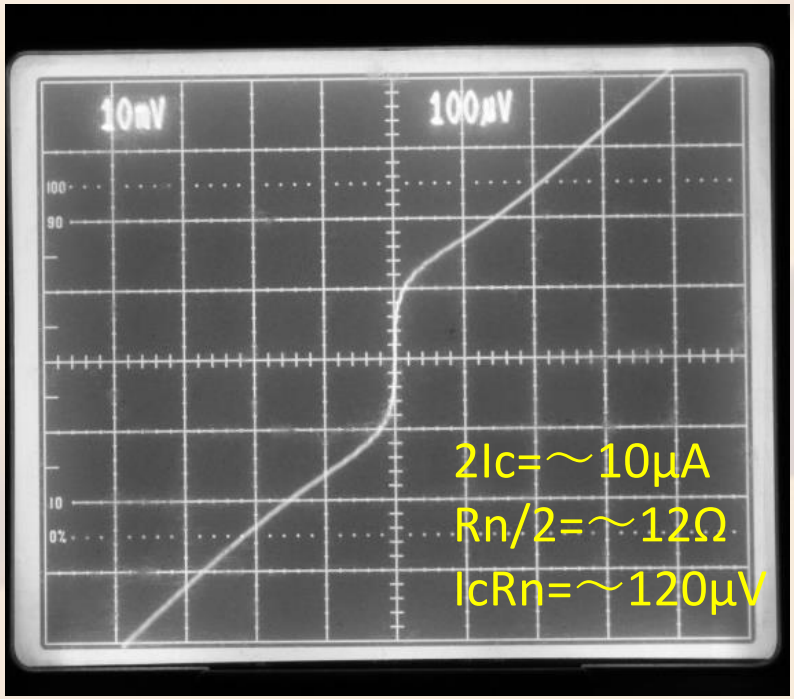
$$I = I_1 + I_2 = I_c(\sin\theta_1 + \sin\theta_2)$$

$$\phi - \phi_0(\theta_1 - \theta_2)/2\pi = n\phi_0$$

$$\longrightarrow \quad I_{max} = 2I_c\,|\cos \pi\phi/\phi_0|$$

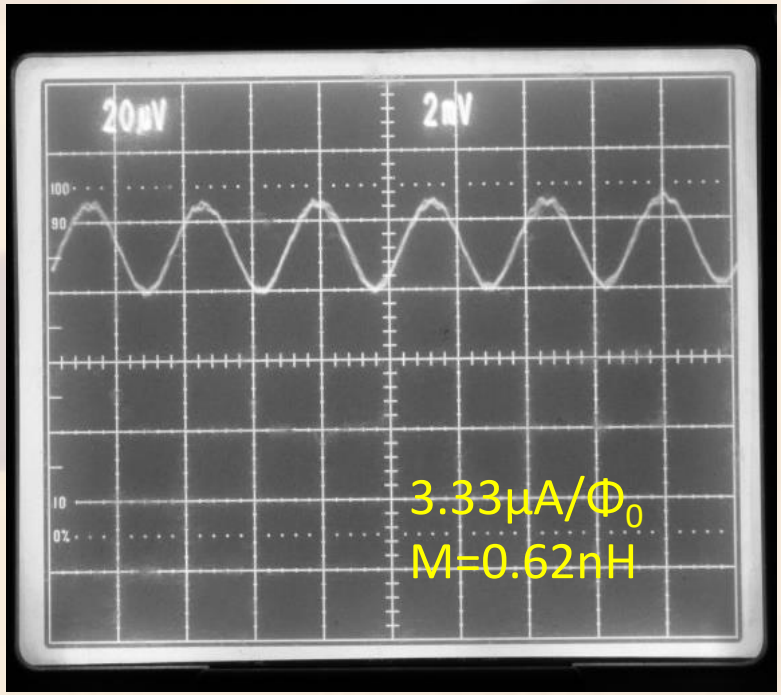
HTS-SQUIDの77kでの特性例

縦軸：10μA/div、横軸：100μV/div



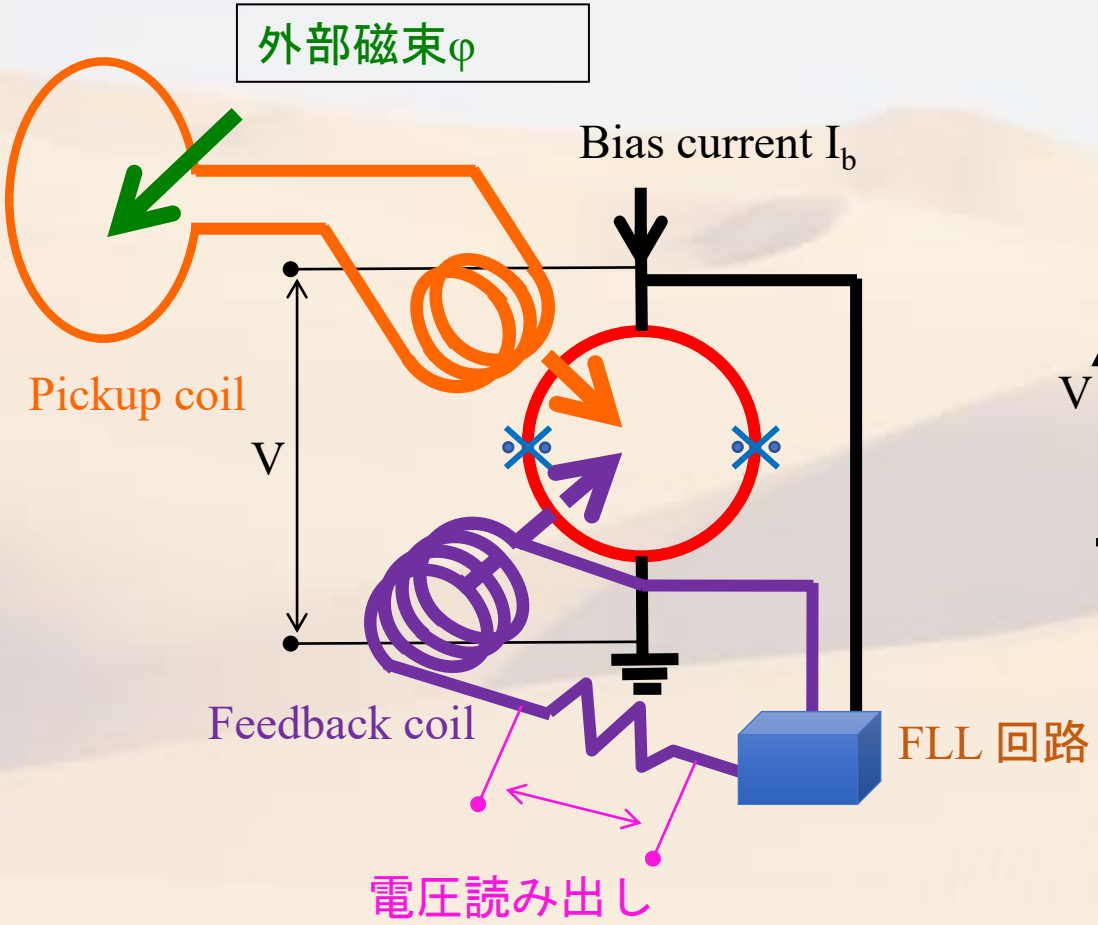
(a) 電流-電圧特性

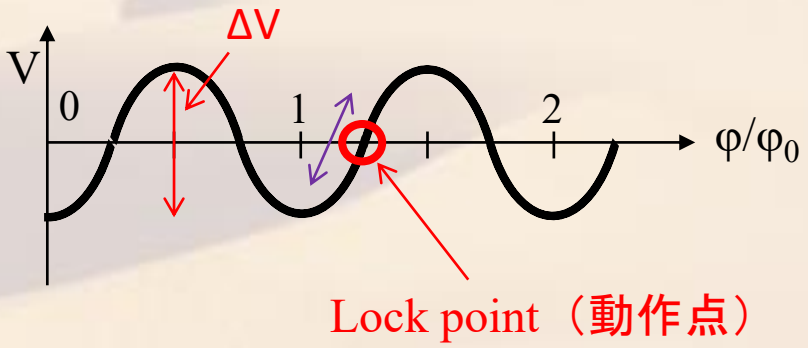
縦軸：20μV/div、横軸：2μA/div



(b) 電圧-磁束特性

（２）磁力計としてのシステム構成

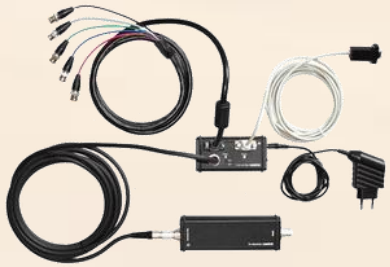




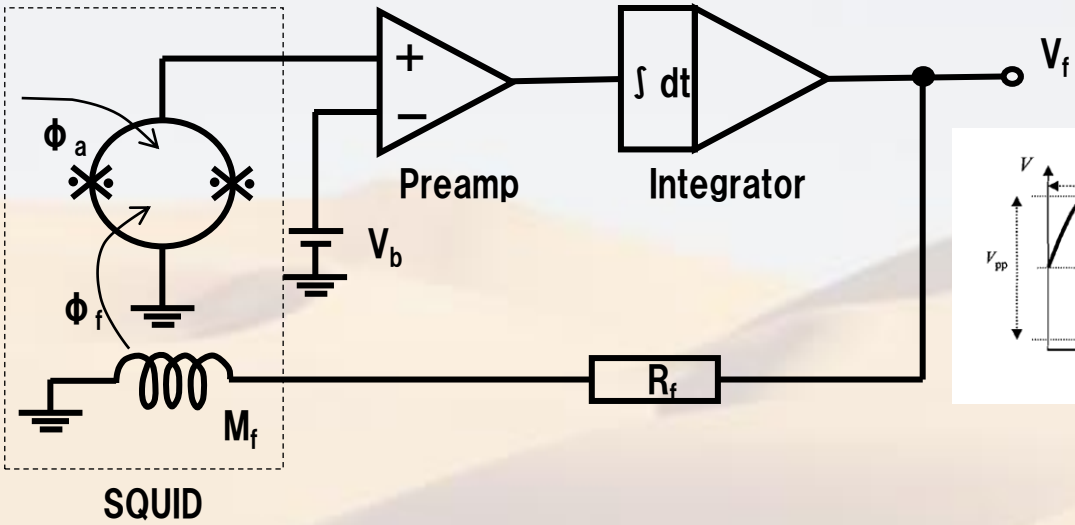
FLL回路

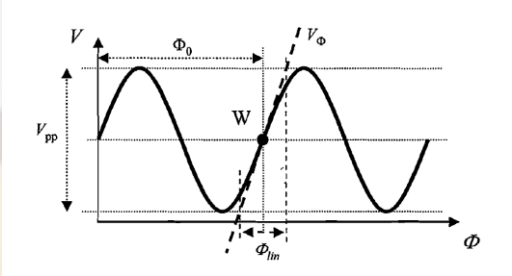
非変調型

回路がシンプル
スルーレート優先
ドリフトが生じやすい



Magnicon　6MHz-20MHz

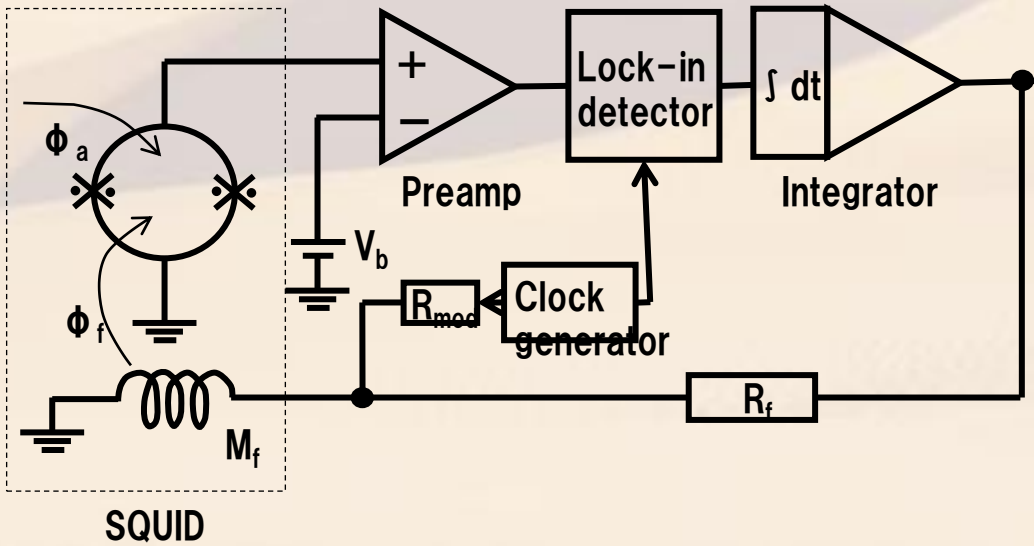


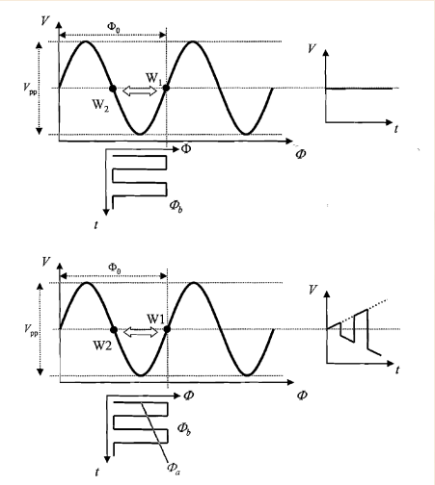


変調型

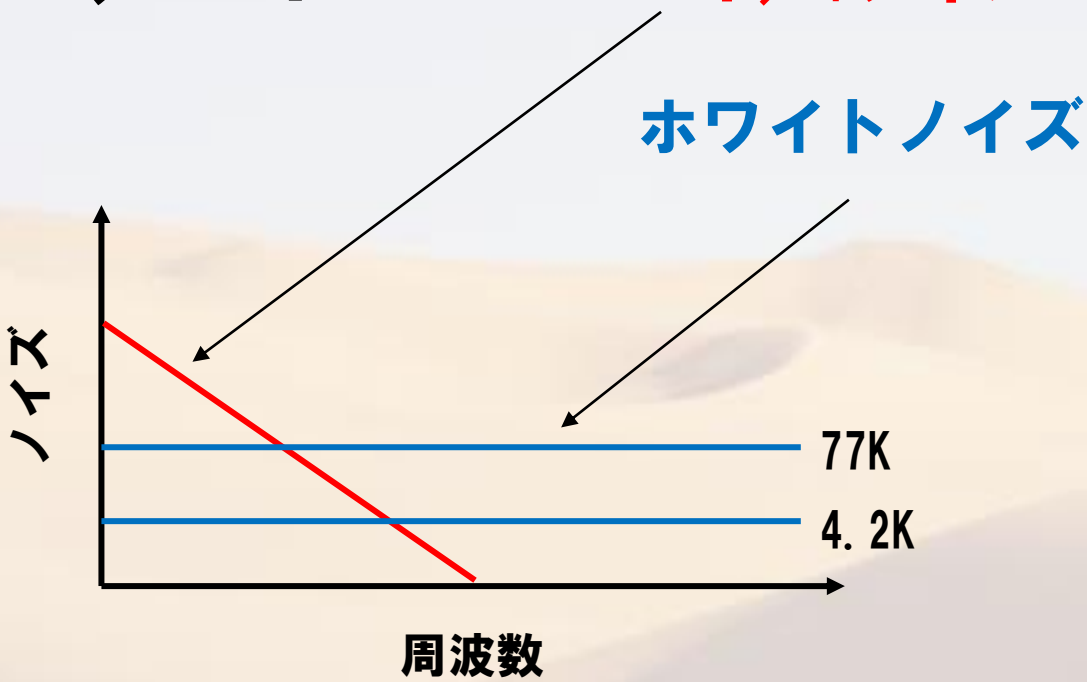
回路が複雑／大型
ドリフトに強く
長時間計測に有利

STAR CRYOELECTRONICS





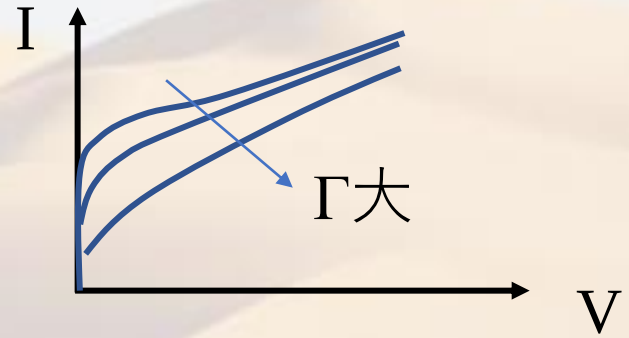
（３）ノイズ



（１）トラップされた磁束の移動
（２）ジョセフソン接合内のI_cの変動

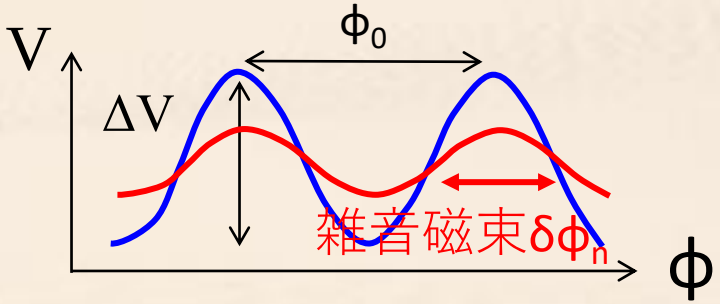
（１）I-V特性のラウンディング

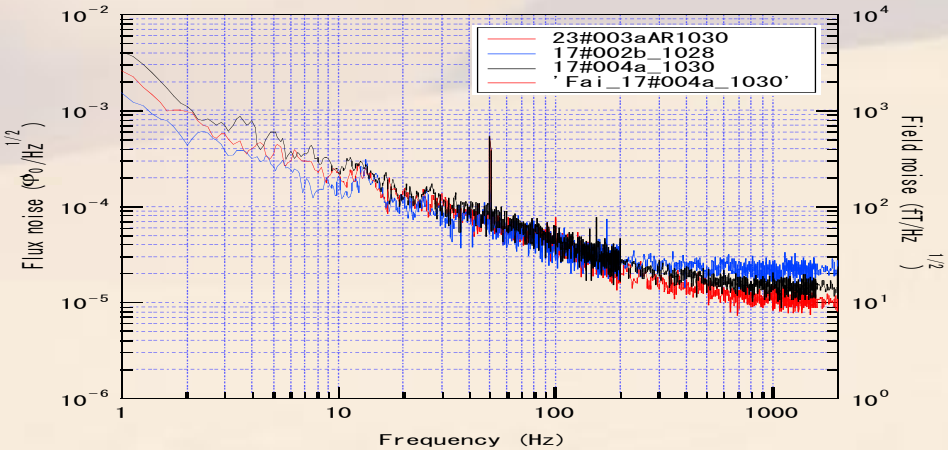
$$G=\frac{2pk_BT}{(2I_c)f_0}$$



（２）インダクタンス内の熱雑音
（雑音磁束）

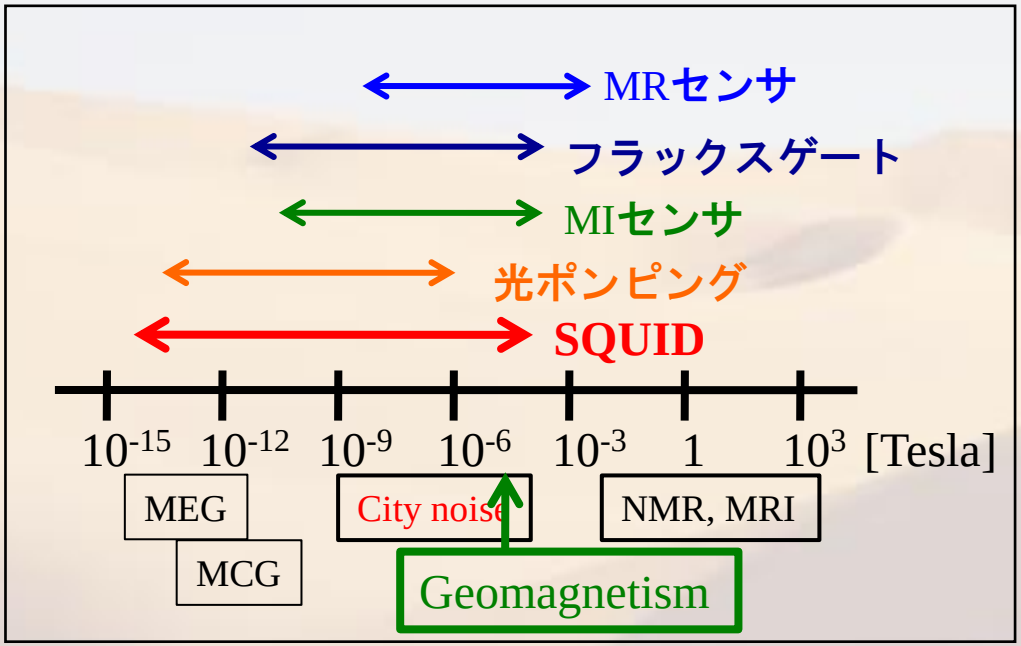
$$df_n=\sqrt{k_BTL_s}$$

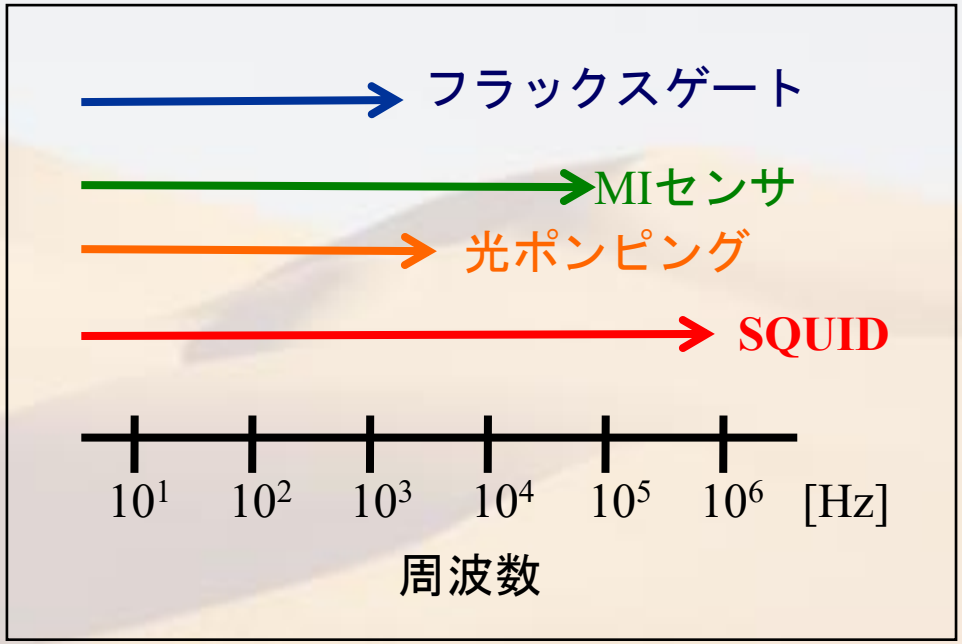




ホワイトノイズ領域で10-25 fT/Hz$^{1/2}$

（４）SQUID感度と周波数帯域





高感度
ワイドダイナミックレンジ
広い周波数帯域
ベクトルセンサ

資源探査向き

課題

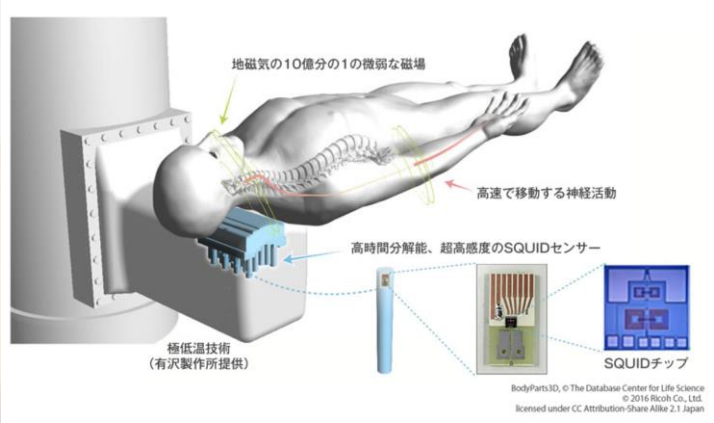
耐磁場性能
スルーレート
冷却の容易さ

SQUIDの応用事例

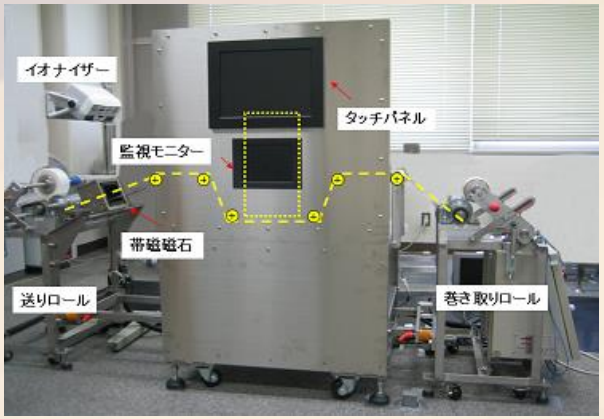
脳磁計 **ELEKTA社**

心磁計　**日立**

脊磁計　リコー



リチウムイオンバッテリーの異物検査　豊橋技科大

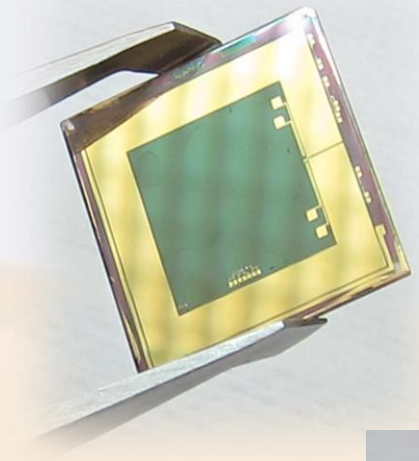


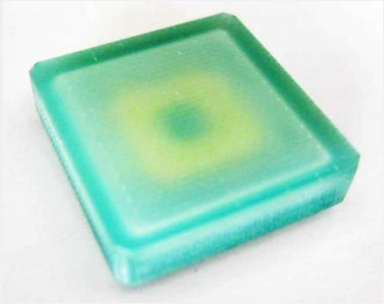
地震観測装置（地磁気）

非破壊検査
- **インフラ**
- **航空機**
- **水素ボンベ**
- **バッテリー**

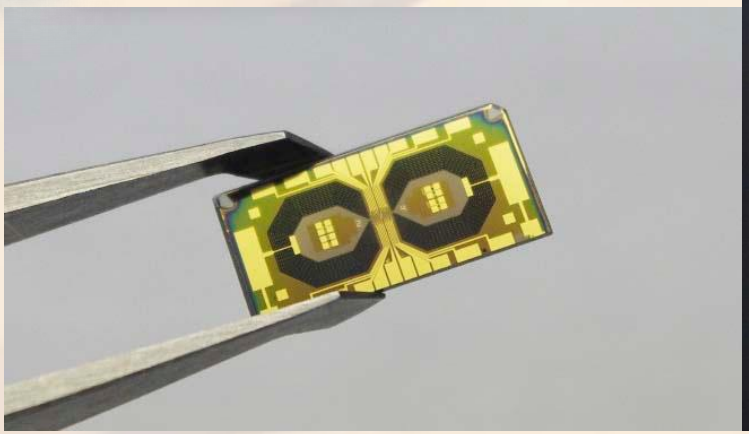
免疫診断
疾病診断
分析・計測　**SQUID顕微鏡**

・
・
・

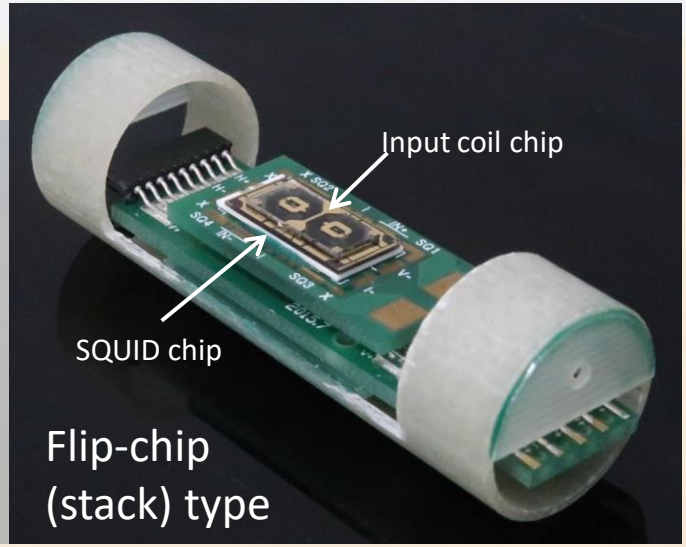




マグネトメータモジュール



高バランスグラジオメータ

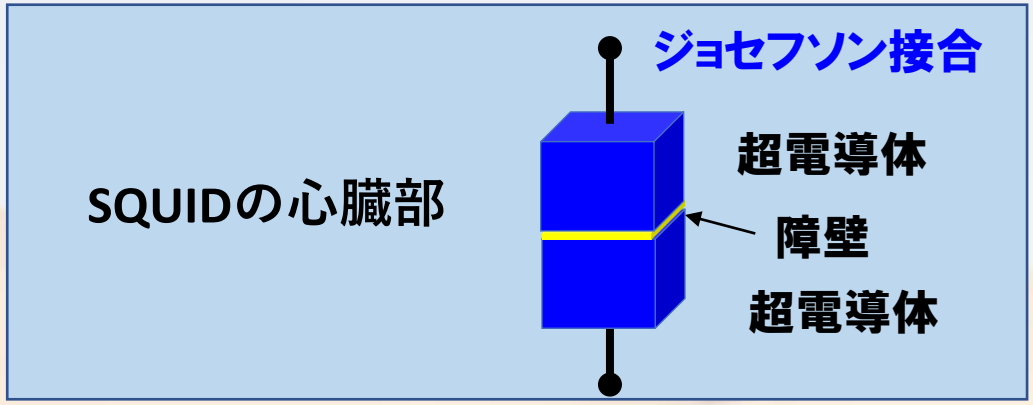


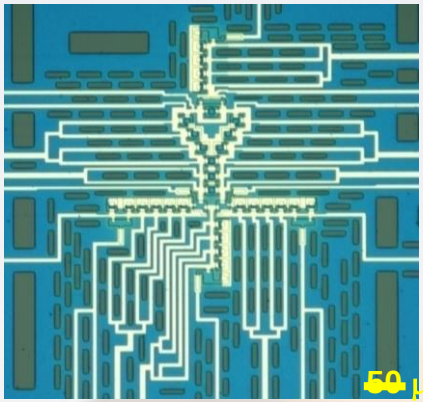
外付けピックアップループ用
グラジオメータモジュール

+ Baseline = 5 mm
+ Imbalance < 10^{-4}

+ enable flexible system design
+ mostly used for NDT systems
magnetic immunoassay system

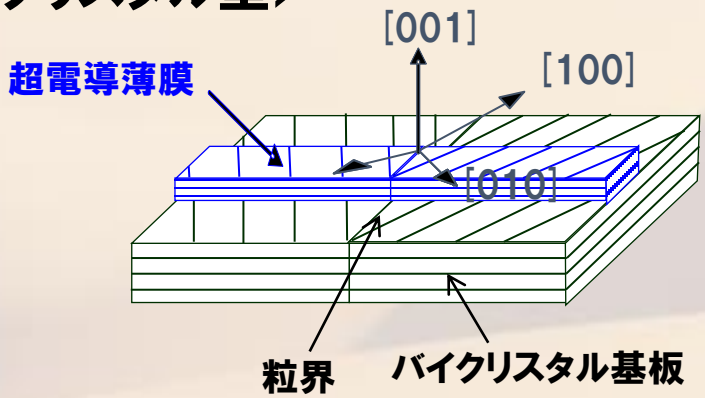
世界のHTS-SQUIDと何が違うのか



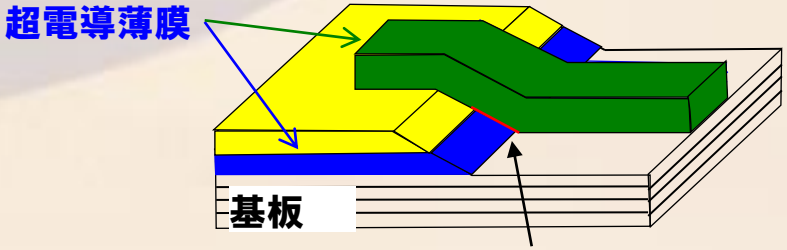


集積回路用多層化技術の転用

<バイクリスタル型>



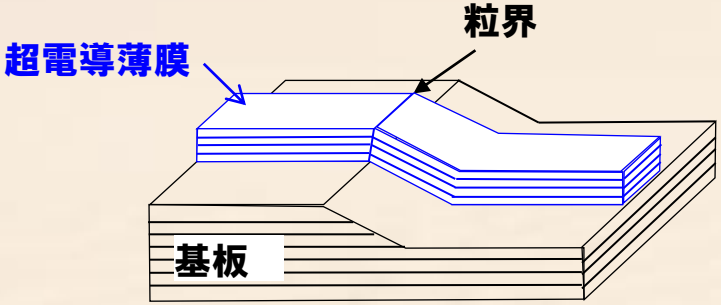
<ランプエッジ型>



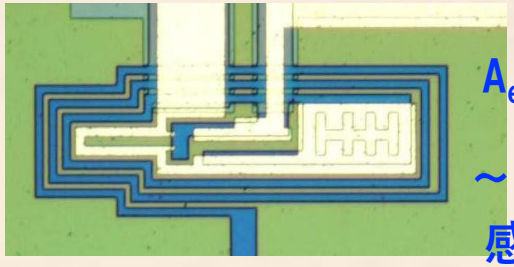
接合は超電導膜で覆われている

耐磁場性能
最大15000倍

<ステップエッジ型>



地磁気の170倍
でトラップしない



A_{eff}～0.6mm^2

～ 30fT/√Hz

感度が高い

2. 脱炭素社会の実現に必要な地下観測のニーズとSQUID

社会のトレンドは脱炭素社会

従来の電磁探査

SQUID技術

大深度高精度電磁探査

日本独自技術によるブレークスルー
ゲームチェンジャー

地層構造を可視化できる技術 ⇒ 貯留槽内部を可視化できる技術

新規油田開発

既存油田の再利用

CCUS事業（CO_2）

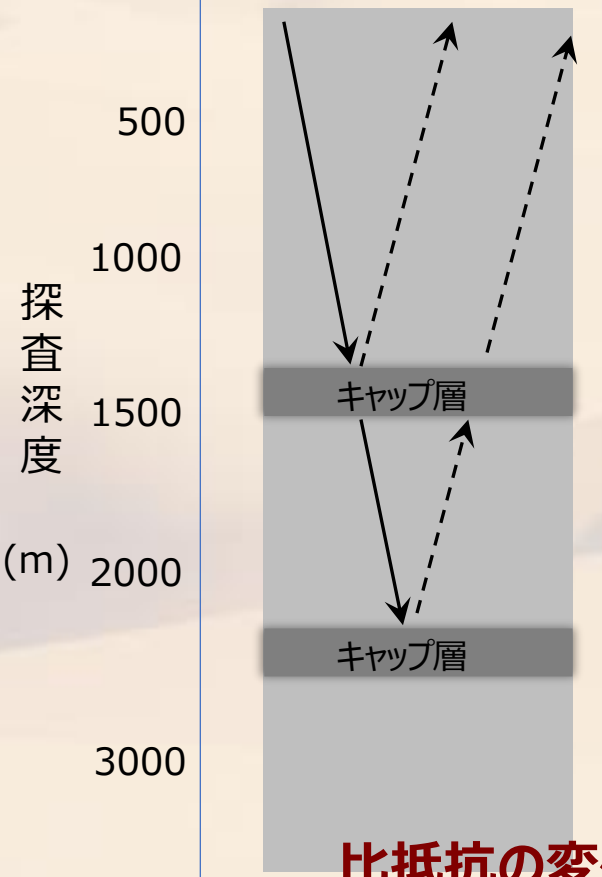
地熱開発（代替自然エネルギー）

（従来技術）

弾性波探査

（振動の跳ね返りで調べる）

硬い地層の場所特定



電磁探査

地層の**比抵抗**を測定

TEM法

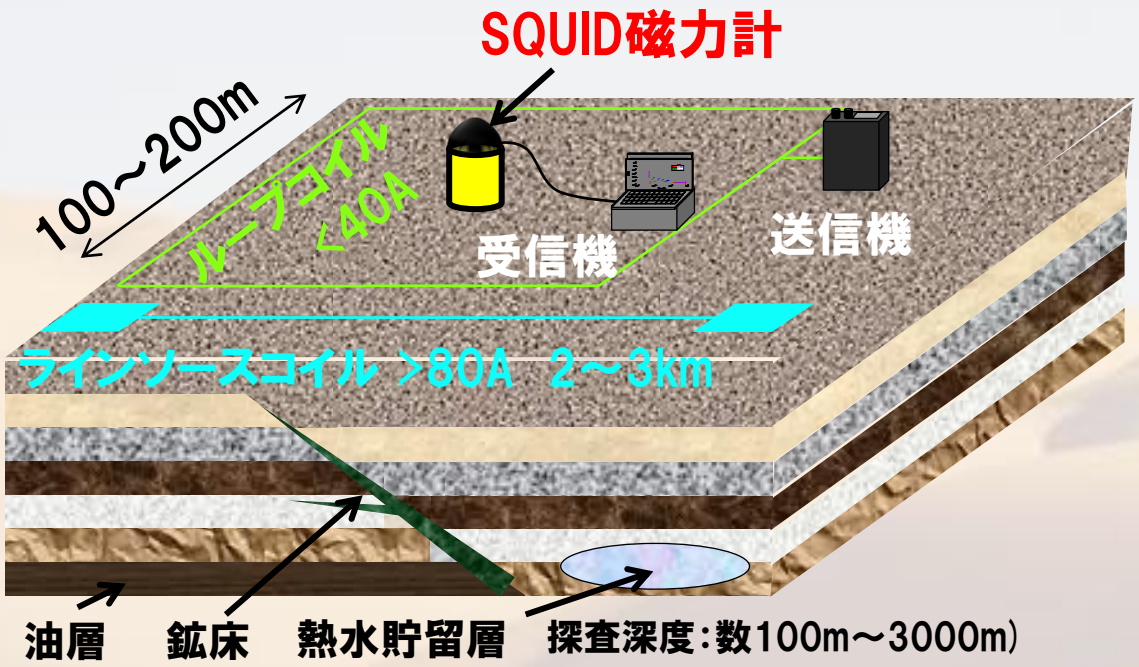
センサの感度不足で測定不可

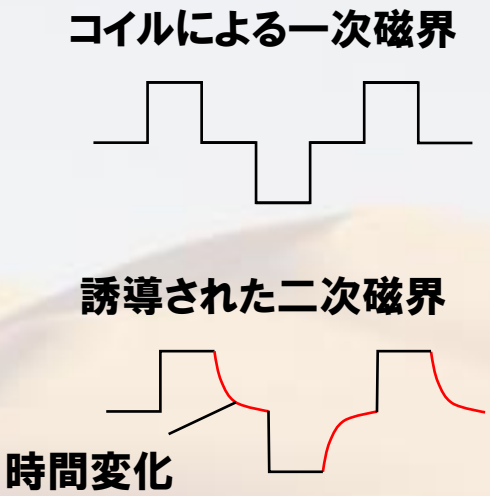
比抵抗の変化で中の状態変化が観測しやすい

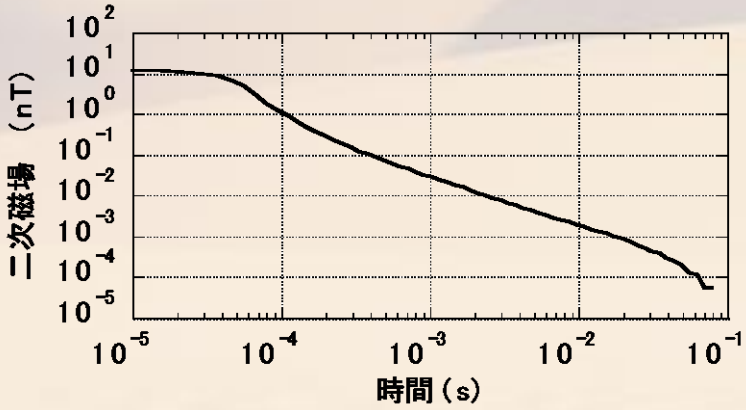
SQUIDをTEM法に使うと

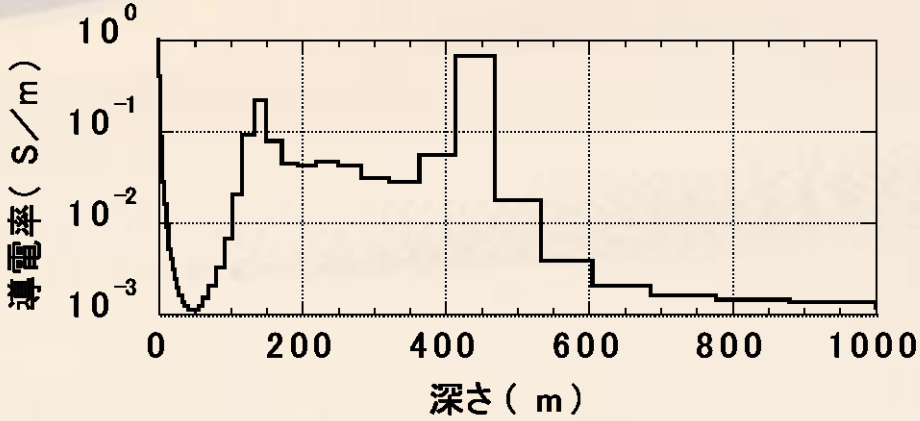
深さ3000mまでの状態を見守ることが可能

TEM法の概略　(Transient electromagnetic)









世界のHTS-SQUID-TEMシステム

	CSIRO	Julich	Supracon	Tristan	SUSTERA
SQUID Type	dc	rf	dc	dc	dc
Noise in field @25Hz (fT/√Hz)	45	1000	20-50	50	40
Bandwidth (KHz)	1000	20	2000	50	100
Dynamic range (dB)	110	130	145	160	146
Slew rate (mT/s)	2.66	2	2-3	1.1	10.5
Weight (Kg)	6	12	5+7	12.2	2.5+0.8
Power (W/channel)	2	3	3	50	0.96

３　脱炭素社会に向けた応用

（１）地熱資源探査・モニタリングへの応用

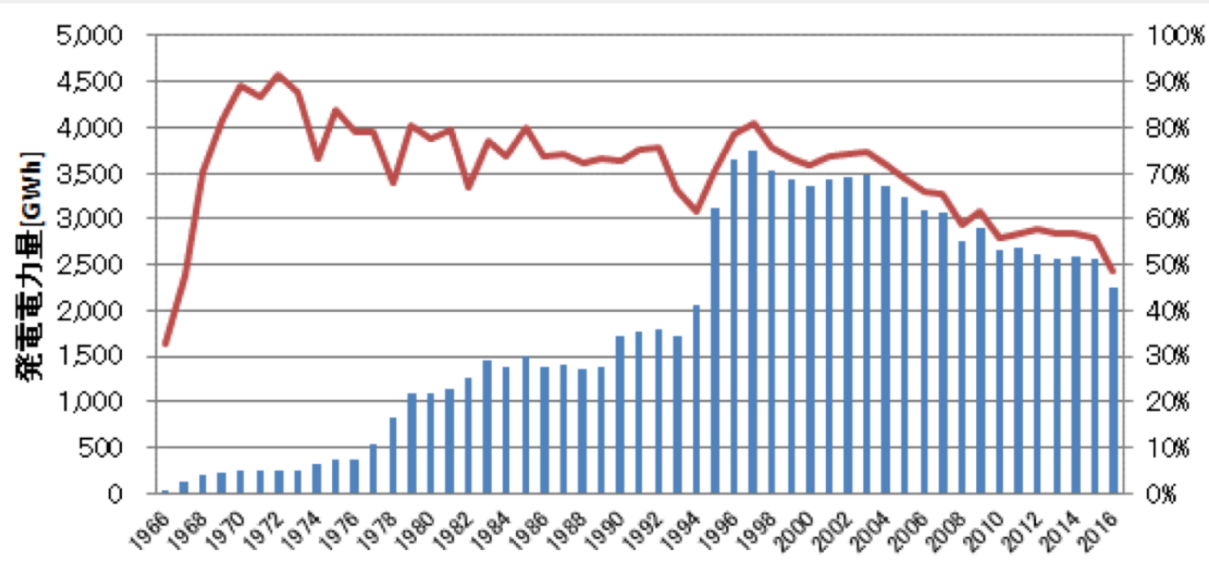
地熱貯留層

１　水：降水の地下への浸透
２　熱：マグマ
３　容器：不透水層が蓋の役割

【主要国における地熱資源量及び地熱発電設備容量】

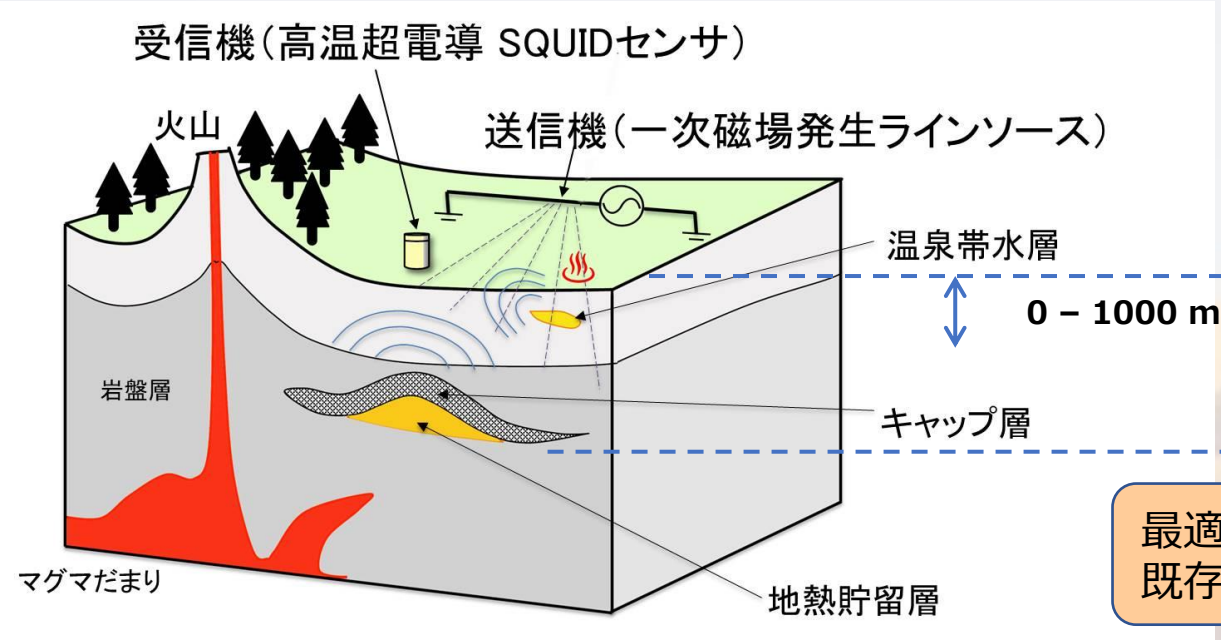
国名	地熱資源量（万ｋW）	地熱発電設備容量（万ｋW）
アメリカ合衆国	３，０００	３４５
インドネシア	２，７７９	１３４
日本	２，３４７	５３（２０１６年度時点）
ケニア	７００	５９
フィリピン	６００	１８７
メキシコ	６００	１０２
アイスランド	５８０	６７
エチオピア	５００	１
ニュージーランド	３６５	１０１
イタリア	３２７	９２
ペルー	３００	０

※平成29年度資源エネルギー庁資料より



国内の地熱発電の年間発電量および設備利用率の推移
環境エネルギー政策研究所　自然エネルギー白書

探査のみならず地下の経過観測（モニタリング）が重要



最適な場所への的確なボーリング
既存温泉資源への影響の最小化

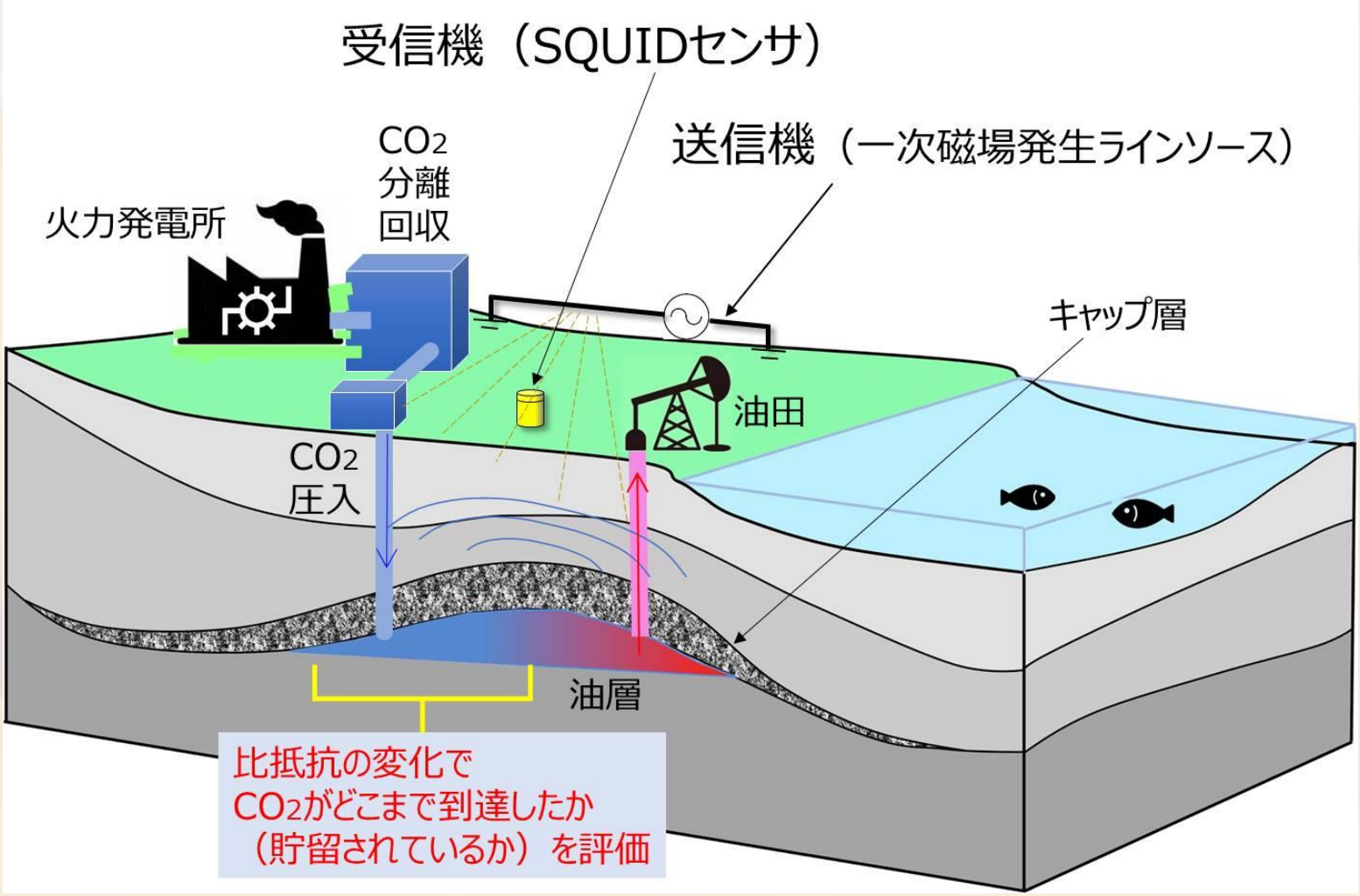
従来技術			SUSTERAの技術
弾性波	重力	MT法	TEM法 (SQUID利用)
波の反射 硬い地層 （キャップ層）	岩石密度 地層構造	電磁応答 熱水層（⇦比抵抗） 1000~10000 m 広域調査に最適	電磁応答 熱水層（⇦比抵抗） 深さ0~3000 m、高分解能 掘削計画検討・掘削後経過観察

地熱探査に使用する地上設置型システム（SQUID-TEM）

探査深度～3000m

LN_2保持時間
移動を含む: ～10h
静置:～17h

（２）二酸化炭素地下貯留（CCUS）と油層の有効活用



比抵抗の変化が大きく、電磁探査が有用

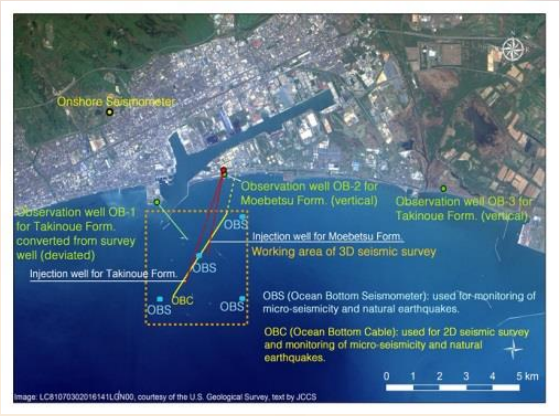
これまでの進捗状況

PTTEP（タイ国有石油会社）、JOGMECの共同研究事業による野外試験（2017/11）
　MINDECOとSUSTERAが実働部隊として参加

タイ Sirikit油田（地下2000mの水圧入の油層）地区での計測試験（ラインソースを用いたTEM法）

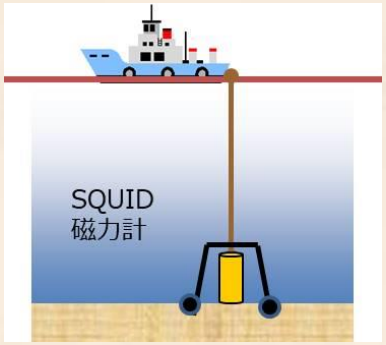
油層の比抵抗分布計測の可能性を実証

TechnoImaging社（米国）との技術協力によりモニタリングの高精度化予定（協業契約締結済）
3成分測定、3D逆解析

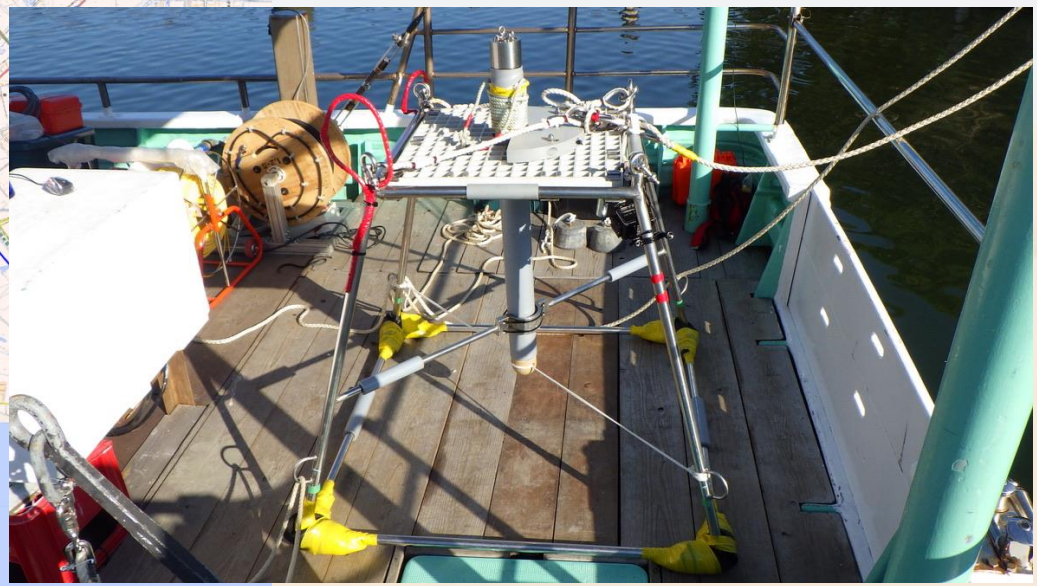


環境省プロジェクト（2018-2020）において海底下CCS（苫小牧沖）のCO_2モニタリングのための基礎技術検証済

・数値シミュレーションによる計測可能性検証
・浅海域でのSQUID計測技術検証



多くの世界のCCUSプロジェクトでは海中での計測が必要

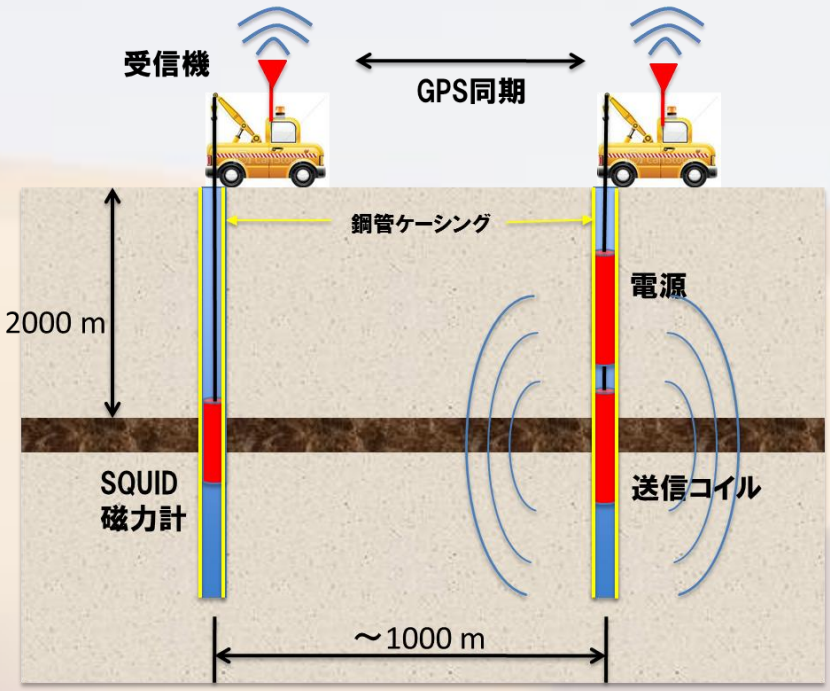


水深100m対応SQUIDシステム

低い環境負荷

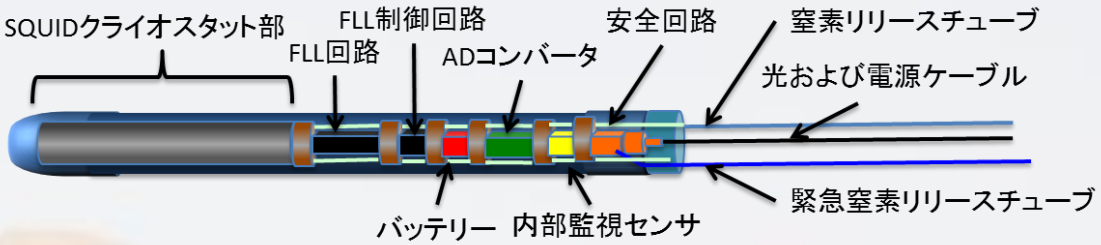
送信電流　100A
発生磁場　（100m）　200nT< 50μT(地磁気）

水深4500m対応SQUIDシステム



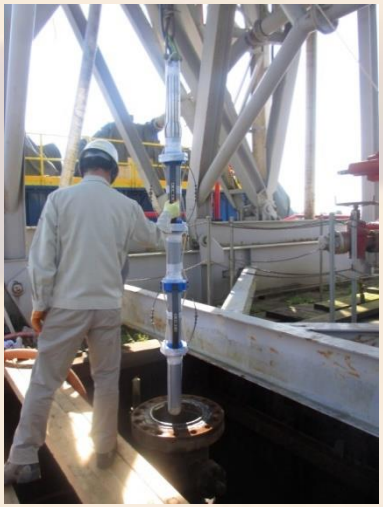
超電導磁気センサ(SQUID)を用いた
広域電磁検層システム(クロスホールタイプ)
の最終イメージ

・CO_2-EOR(Enhanced Oil Recovery)における
CO_2到達状態の比抵抗によるモニタリングを目的
・SQUIDの低周波高感度により従来より1桁広域の
検層、金属ケーシングを通した検層実現を期待
（**過酷環境で使えるSQUID応用技術を開発**）



JOGMECﾌﾟﾛｼﾞｪｸﾄで開発したSQUID磁力計プローブ

耐圧70MPa以上のCFRP容器内に実装
蒸発窒素ガスをチューブを通してリリースすることで77 K維持



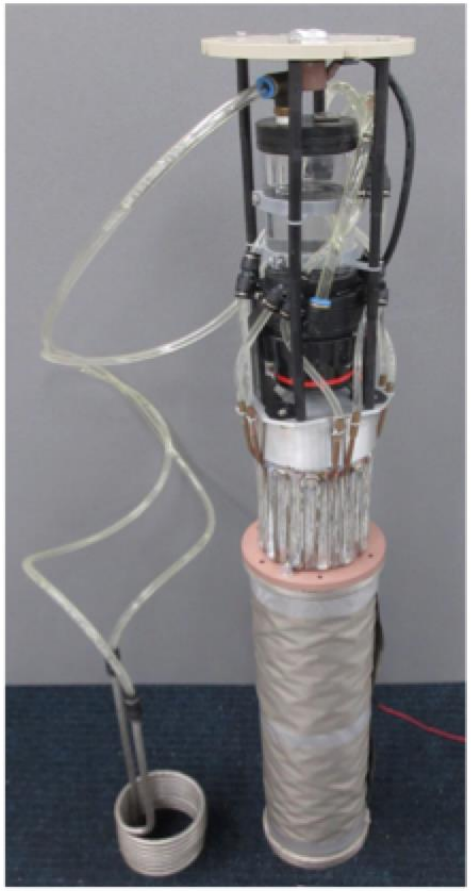
JOGMEC柏崎TFでの
試験の様子

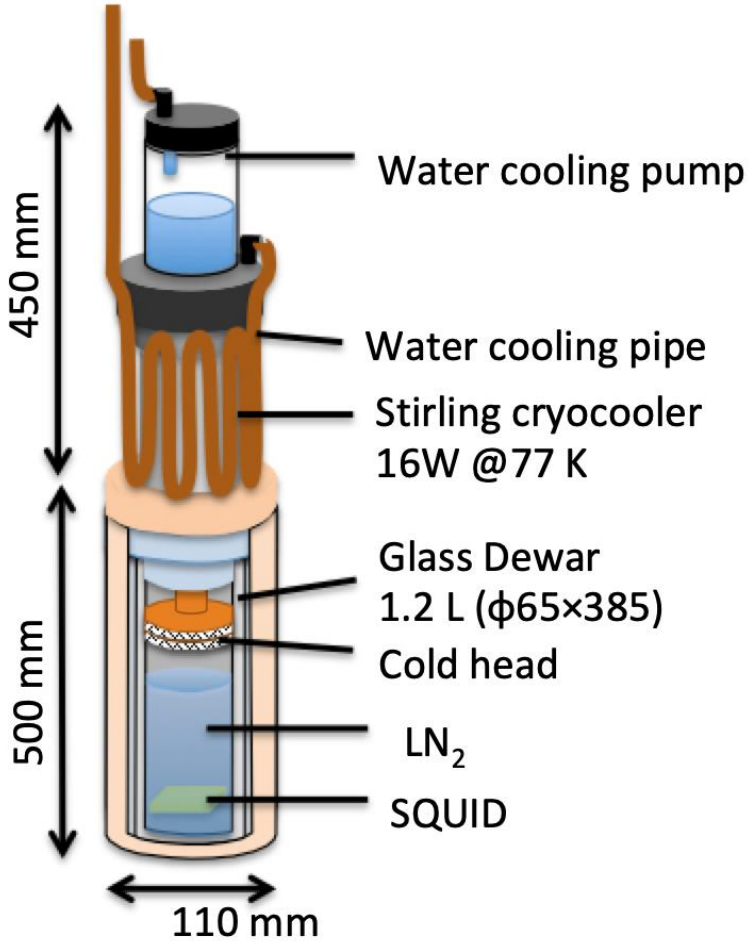
坑井（水）中
深度270mでのTEM信号
受信を確認

坑井内での受信は
高分解能が期待できるが
コスト的には不利

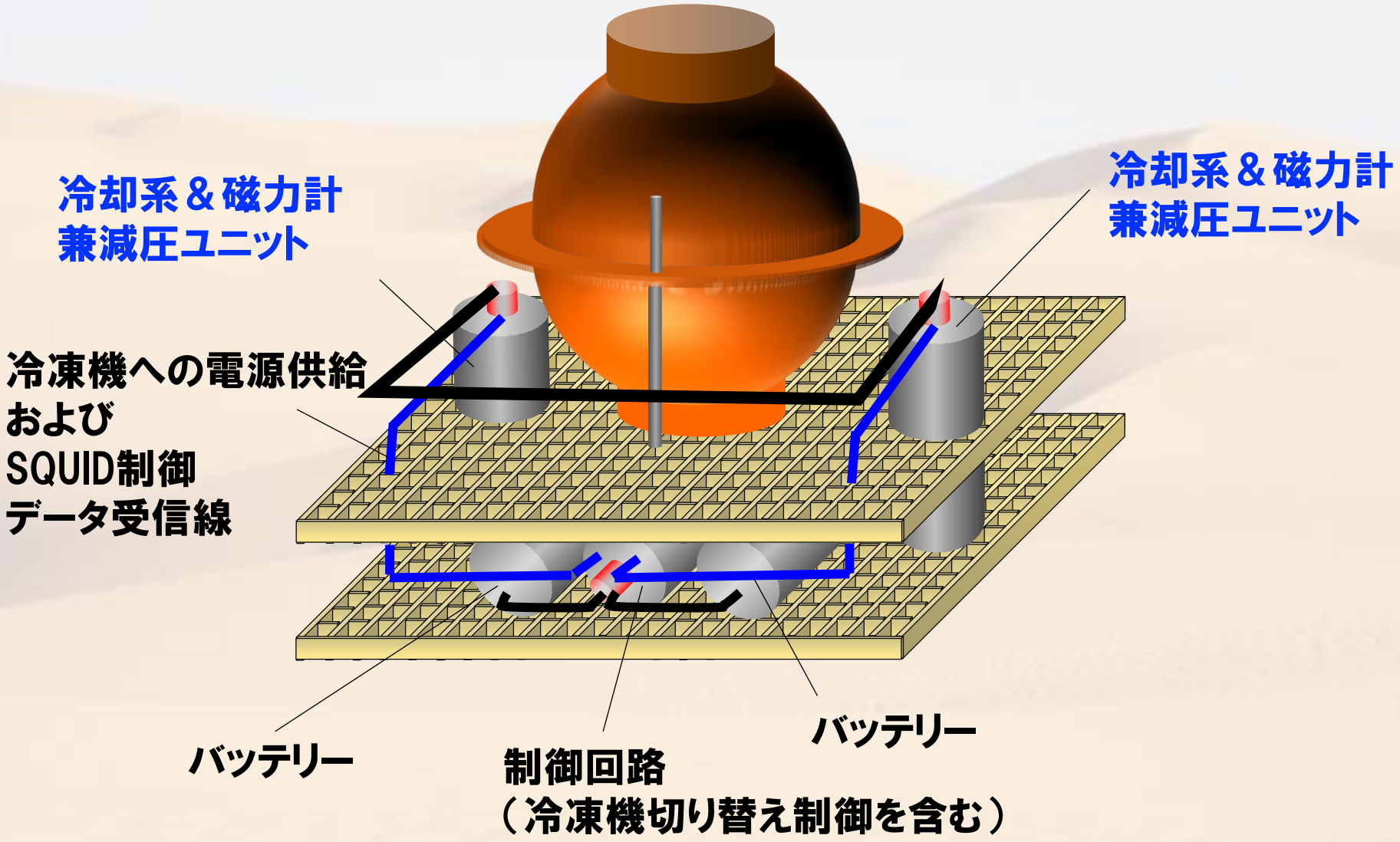
海上（offshore）用の
装置開発に展開可能

水中で長期にわたって運用できるシステム開発
（冷凍機併用ハイブリッド冷却システム）





海底磁力計: OBM(Ocean Bottom Magnetometer)



4. 今後の展開

低コストで貯留層内部をモニタリングできる技術がサービスを決する

日本

古来より金属資源にほぼ限定

資源上流サービスは脆弱

→ 金属資源会社の
下流へのシフトで減退傾向
世界の資源界への発言力低下か

脱炭素社会の到来
新技術への期待

欧米

近代より石油にターゲット

資源上流サービスは統合で巨大化
例：シュルンベルジェ、ペトロレアムジオサービス

→ 巨額な予算：弾性波探査が主力

新技術の登場で
地下モニタリングサービスの
統廃合・再編は必至

SQUID電磁探査技術で
大きなチャンス