



熱電用電力変換回路のフォールト・ トレラント設計

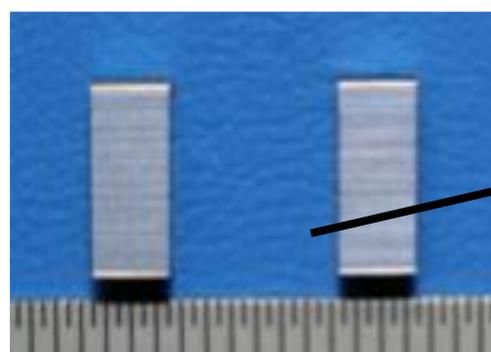
岡山理科大学 工学部 電気電子システム学科
准教授 麻原 寛之

令和2年12月15日



熱電池開発コンセプト

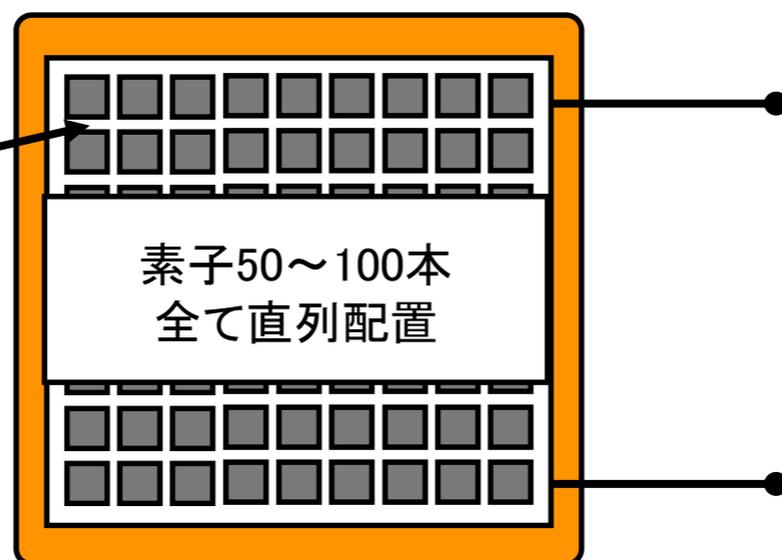
熱電発電素子



3 x 3 x 7.5 mm
(WxDxH)

1本あたり出力
50~60mV, 2A

従来型モジュール構造

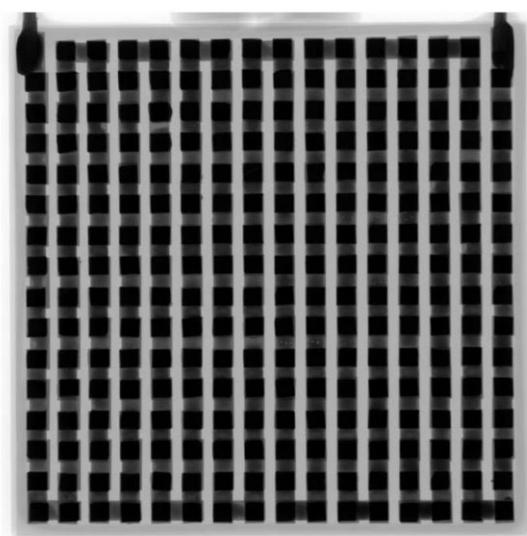


50~100本の発電素子のうち1本で
トラブルがあるとモジュール全体の
出力が得られなくなる

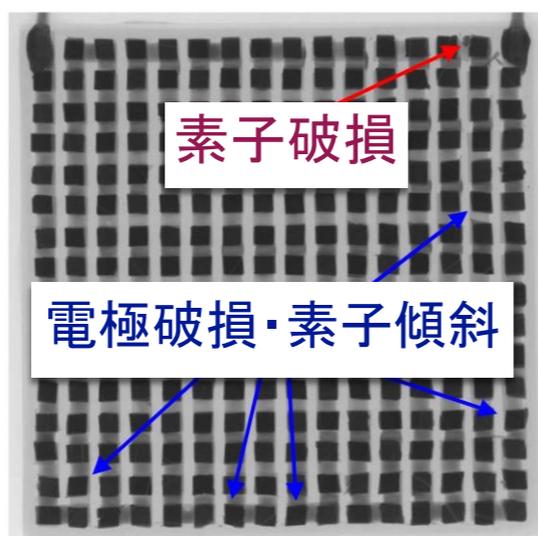
DC出力(～5V)

発電素子の一部が損傷を受け
ても全体への影響を限定化

@三重県工業技術研究所 (vibrated @ sine wave, 110 m/s², 33 Hz)



試験前

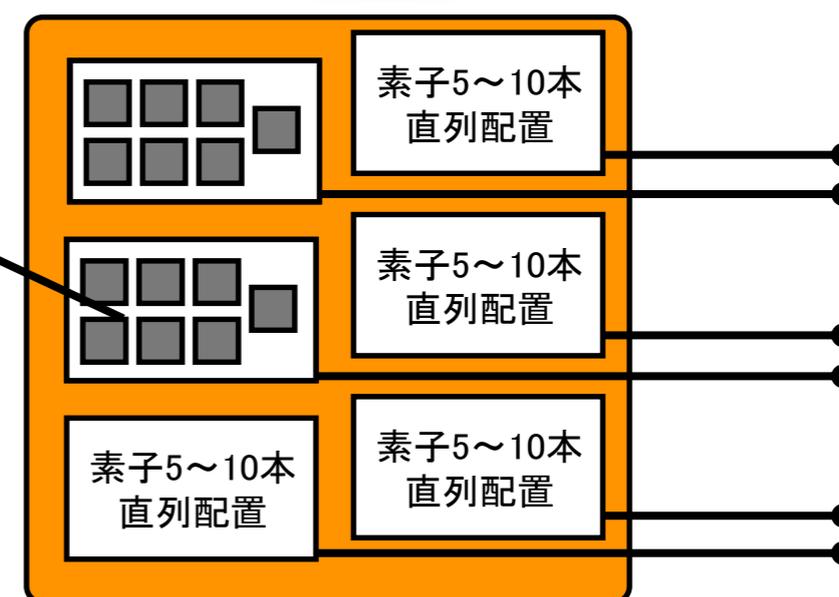


試験後

(素子・電極破損で
導通が取れない)

(60~80 mV x
5~10本)
1モジュール当たり
0.4~0.8 V

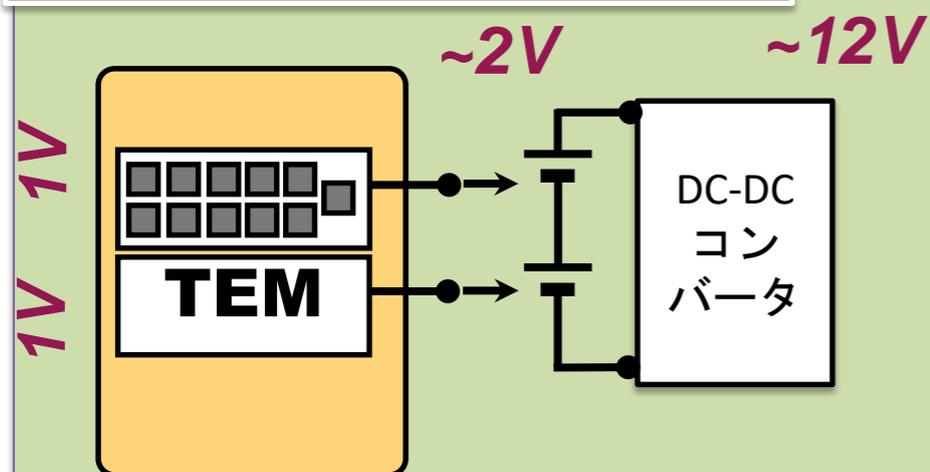
6 モジュール
構造





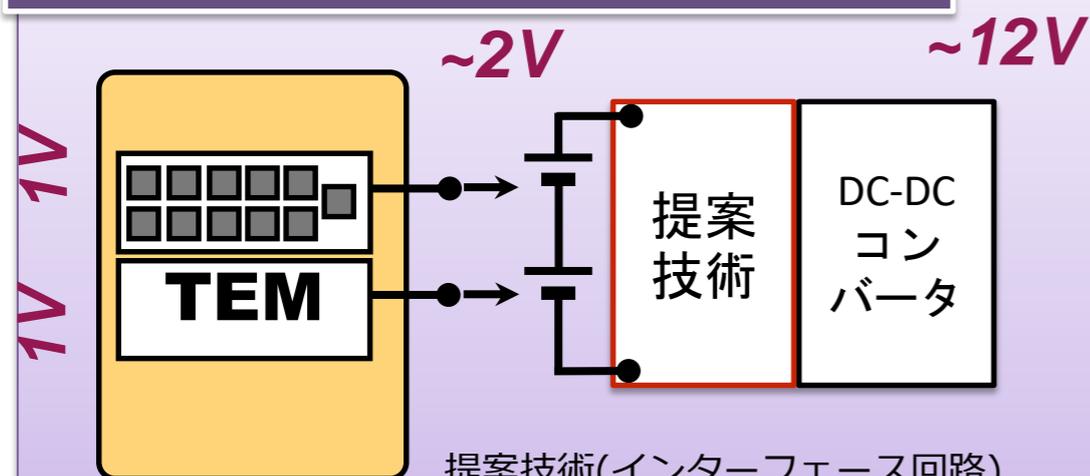
コンバータ開発コンセプト

通常設計



- TEMを直列接続
- 1モジュール故障時にシステム全損 (総出力電圧0V)

フェイルセーフ設計



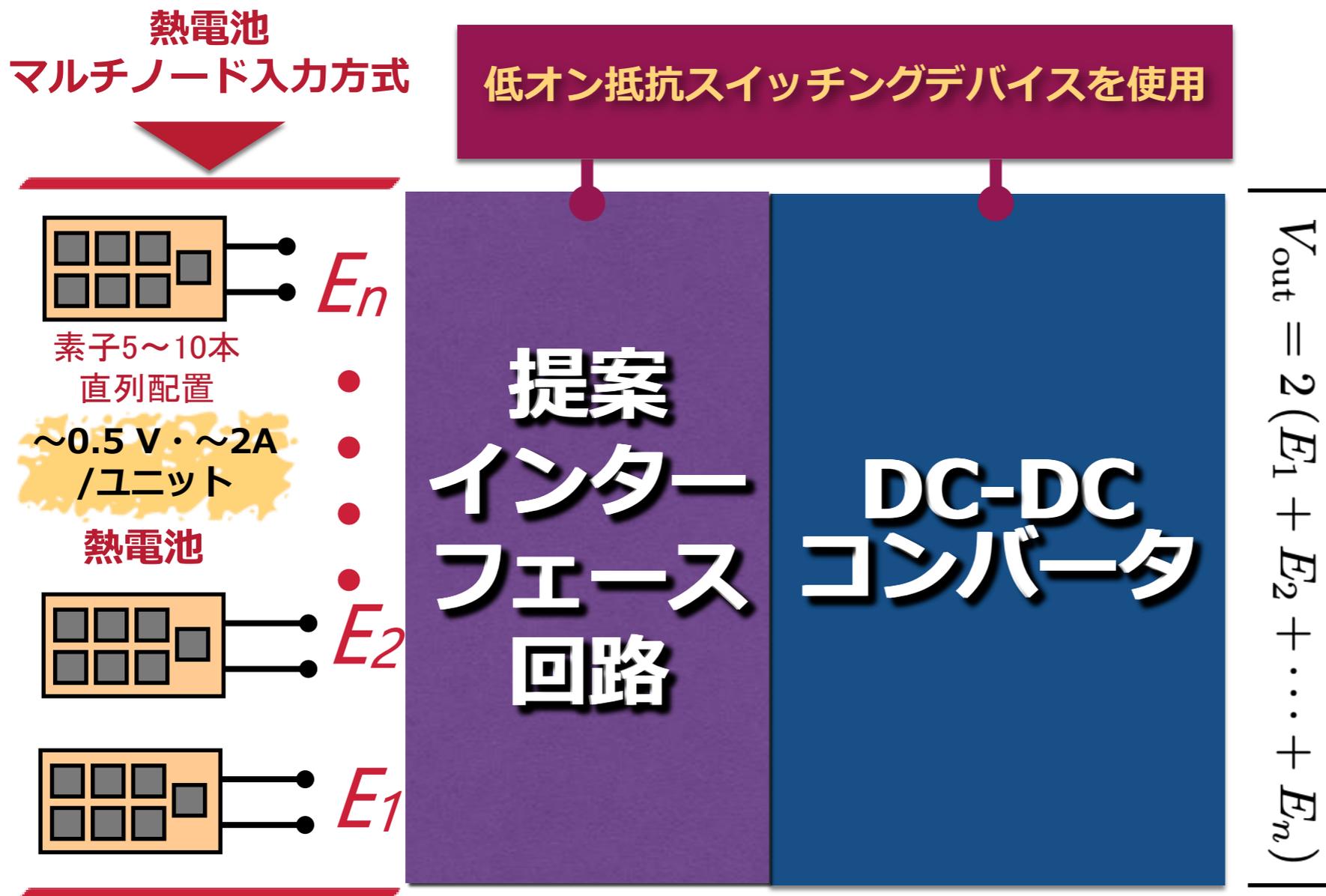
提案技術(インターフェース回路)なしの場合、複数個あるうちの1モジュール故障時にシステム全損

- TEMをインターフェース回路へ接続
- 1モジュール故障時にDC-DCコンバータへの入力電圧0V (システム全損) を回避

開発回路の概念図



ECOLOGY & GREEN ENERGY



回路自体が新方式

パイルアップ型
DC-DCコンバータ

インターフェース回路の
出力電圧を, DC-DCコ
ンバータを用い~2倍に
昇圧

+

各熱電池の出力を, イン
ターフェース回路へ入力
し, 複数ユニット分パイ
ルアップし集電.

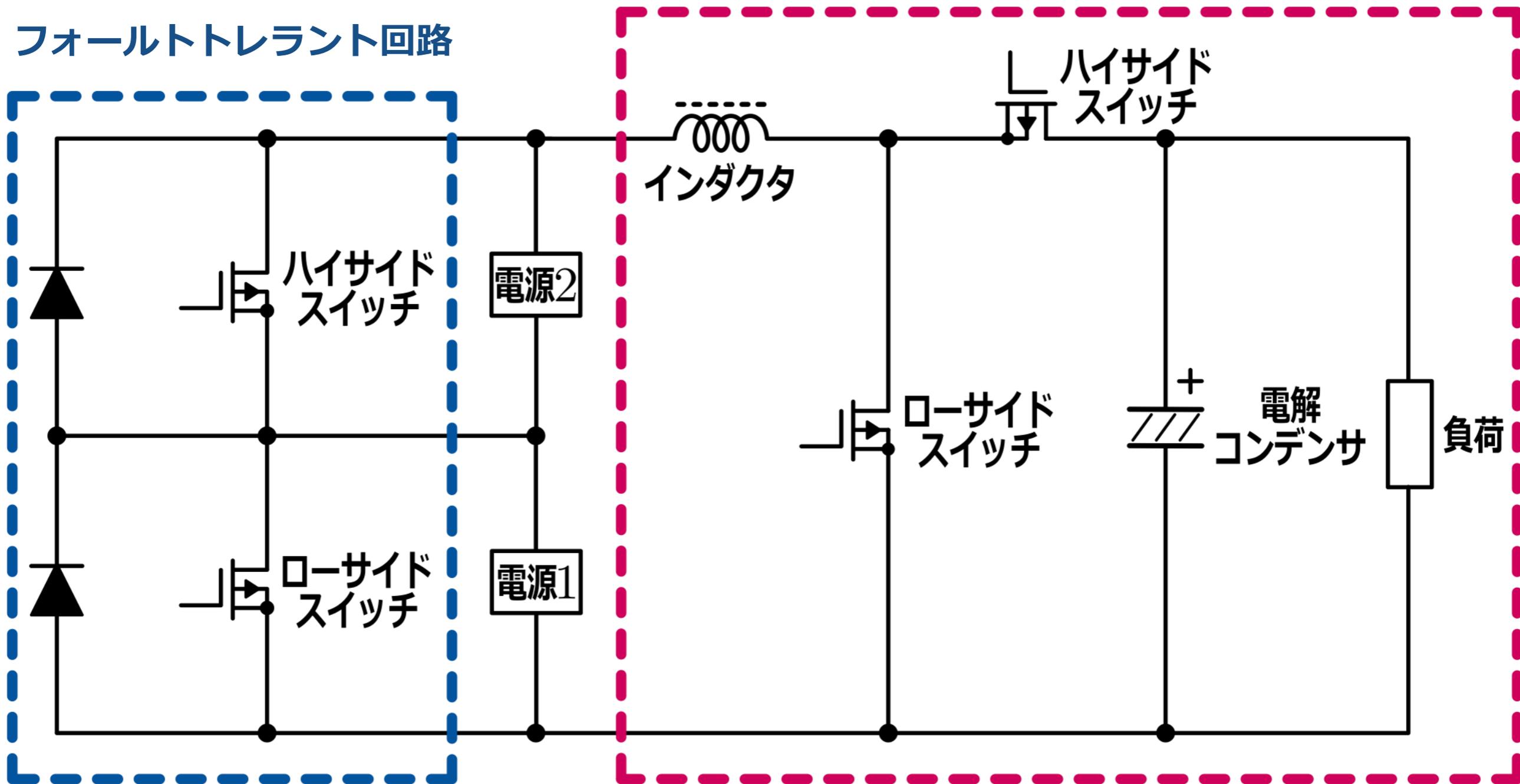
熱電モジュールの故障を検知し, システム全損を避けるフォールト
・トレラント回路について紹介する。



電力パイルアップ型コンバータ (主回路)

DC-DCコンバータ

フォールトトレラント回路

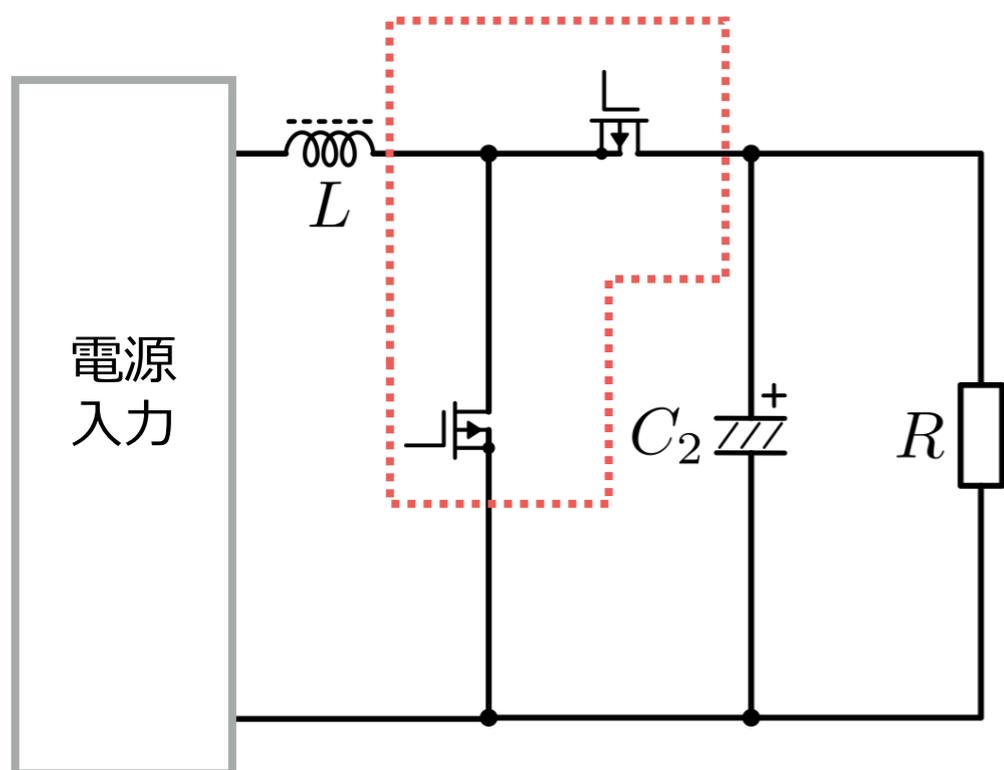


同期整流型スイッチとドライバ回路の構成

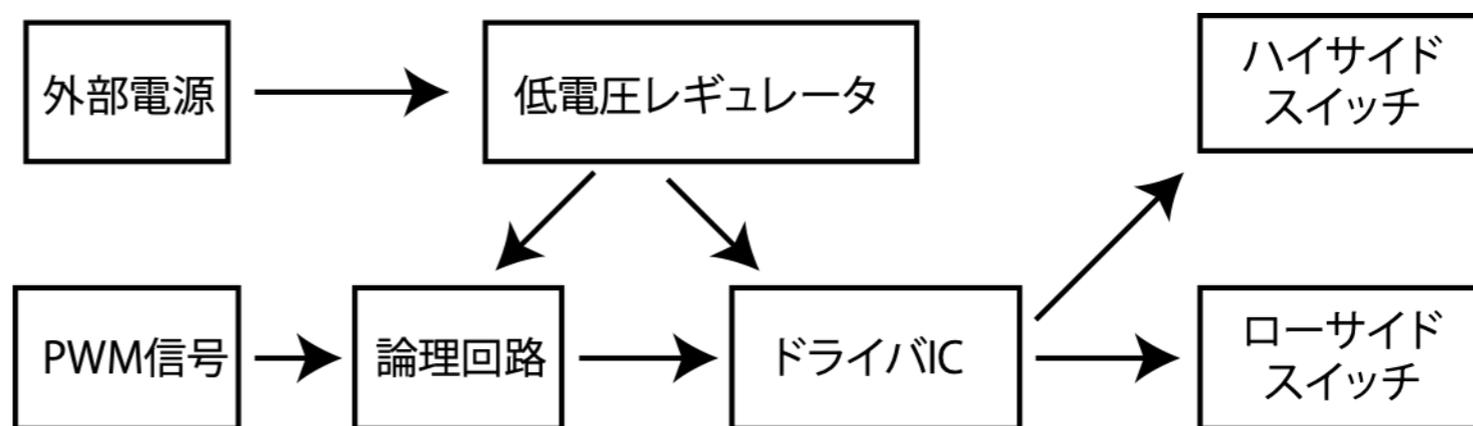


ECOLOGY & GREEN ENERGY

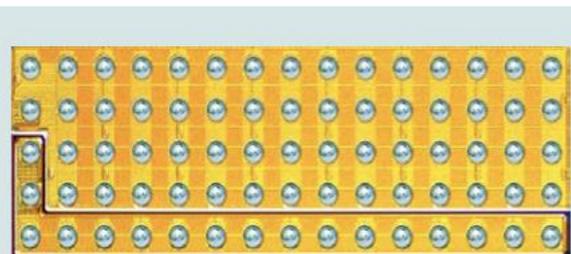
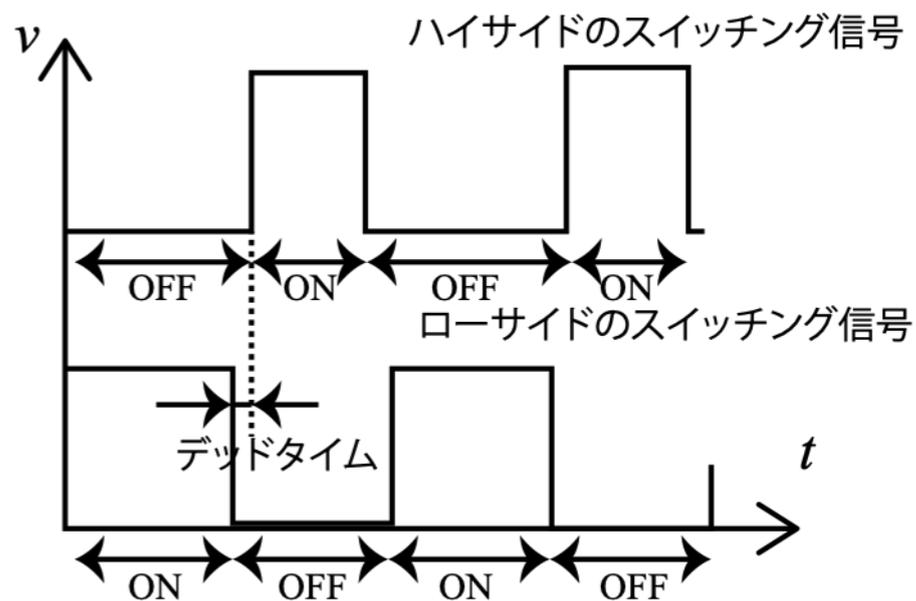
同期整流型スイッチ



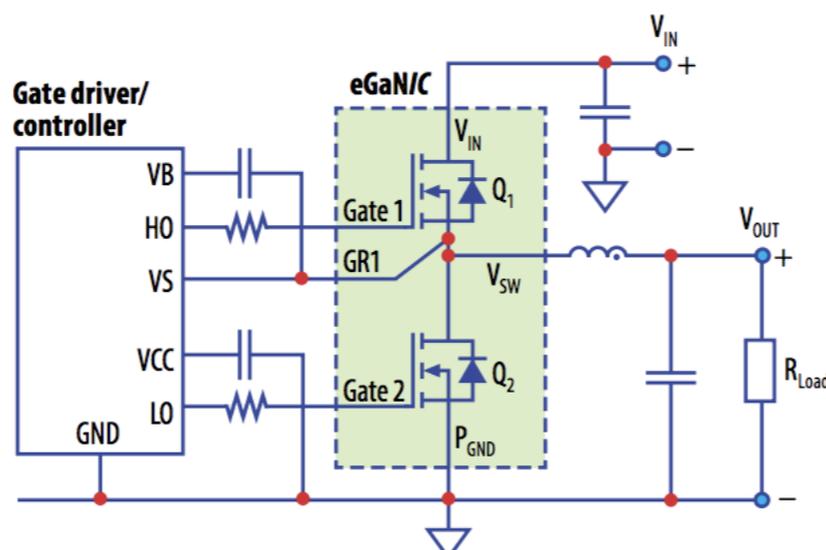
ドライバ回路の全体構成



- 入力PWM信号を反転
- デッドタイムを作成

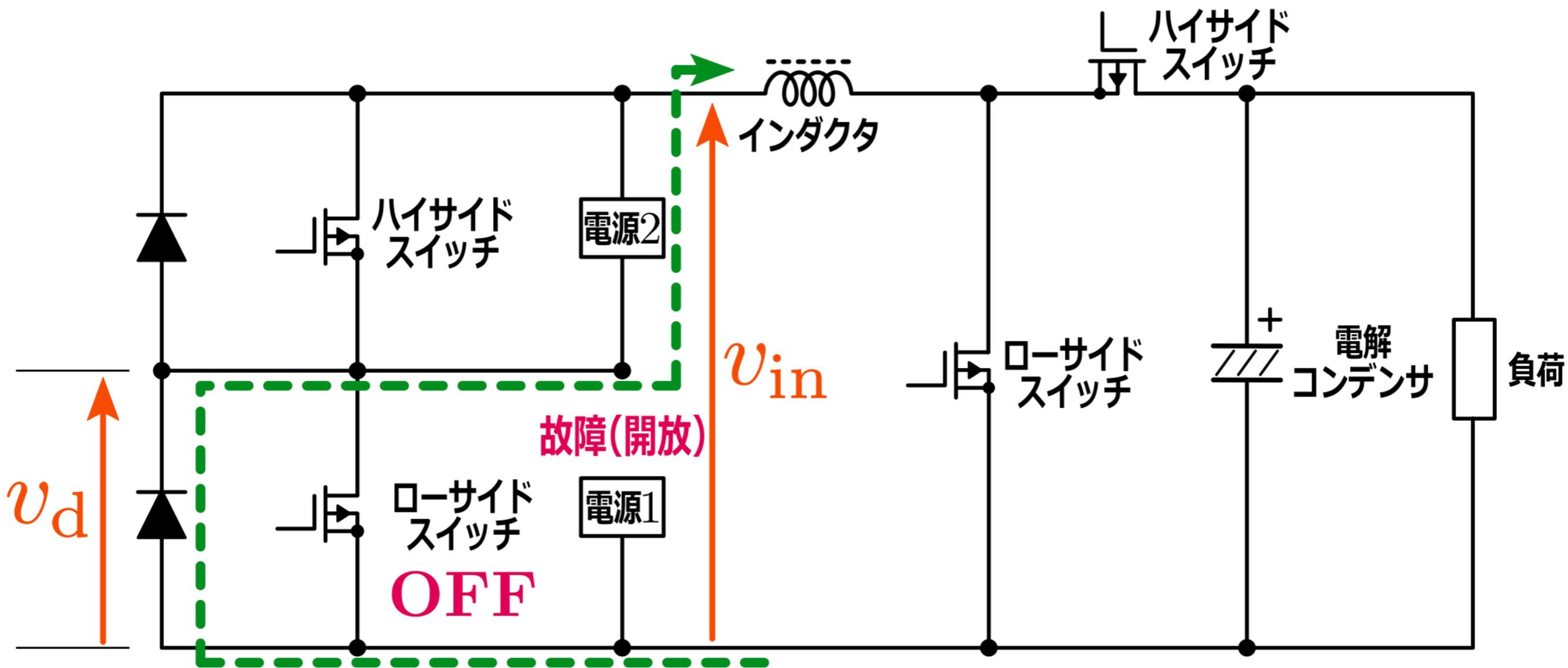


EPC2100 eGaN[®] ICs are supplied only in passivated die form with solder bumps
Die Size: 6.05 x 2.3 mm





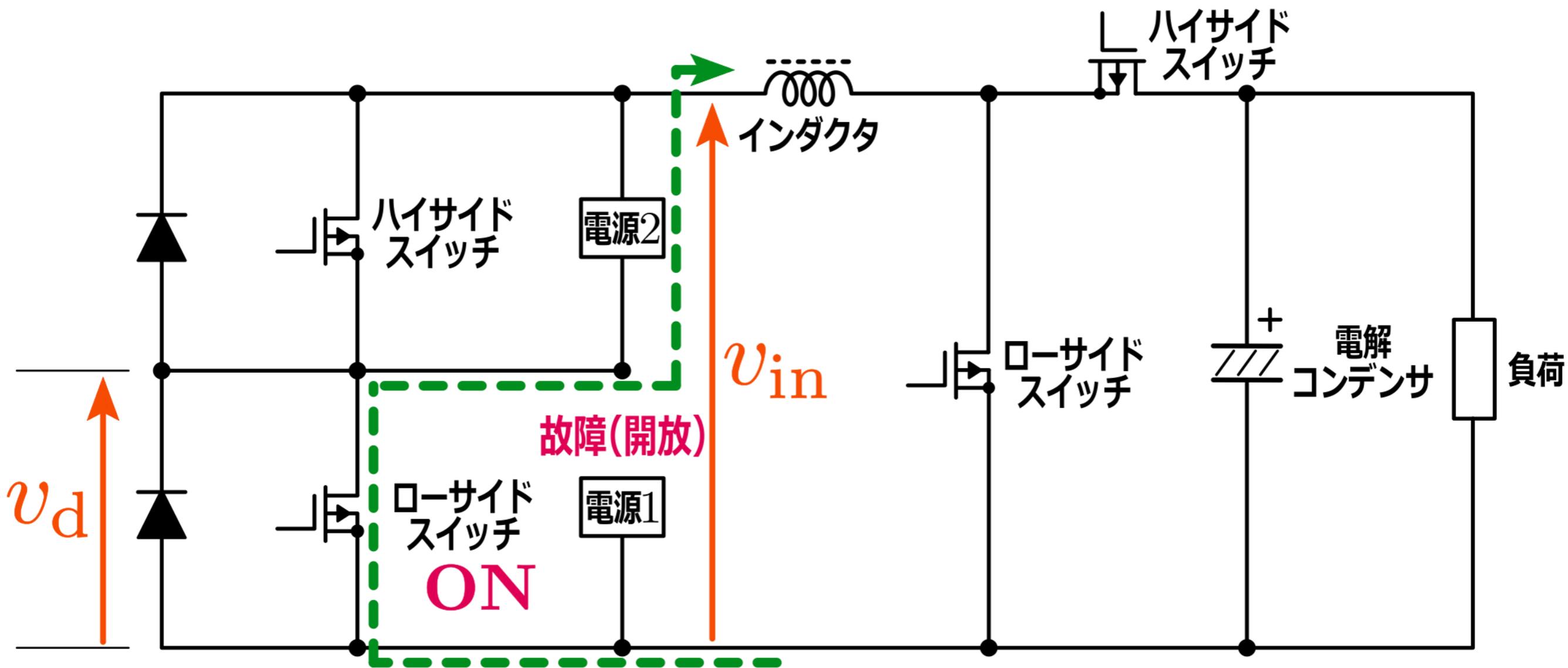
電力パイルアップ型コンバータ (主回路)



ローサイドスイッチがOFFのとき，故障した電源1に
並列接続されたダイオードを經由して電流が流れる。



電力パイルアップ型コンバータ (主回路)

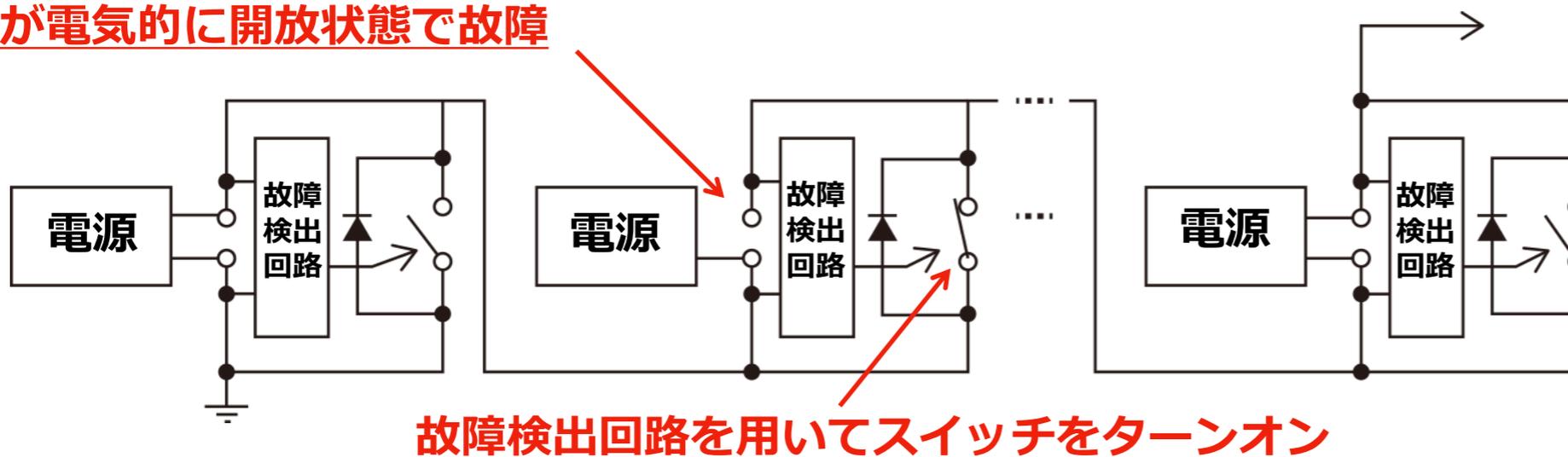


ローサイドスイッチがONのとき、故障した電源1に
並列接続されたローサイドスイッチを經由して電流が流れる。



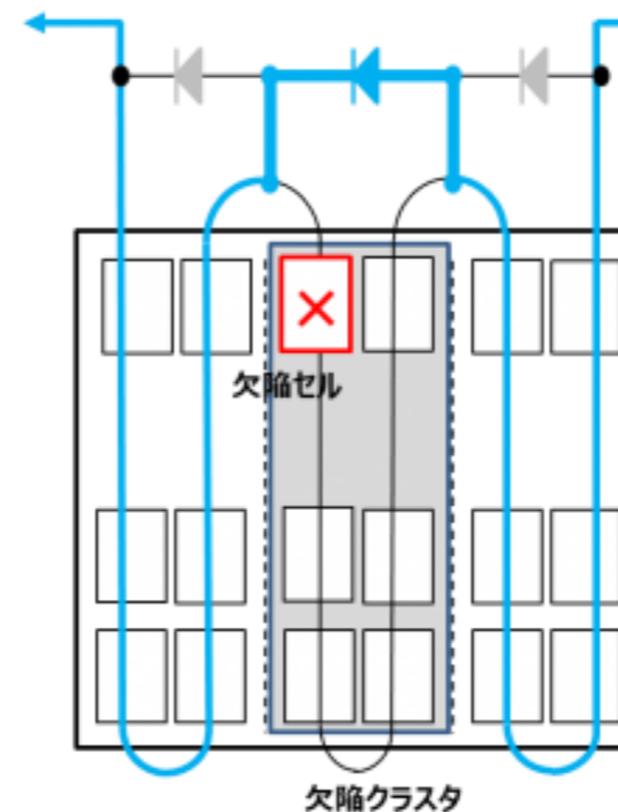
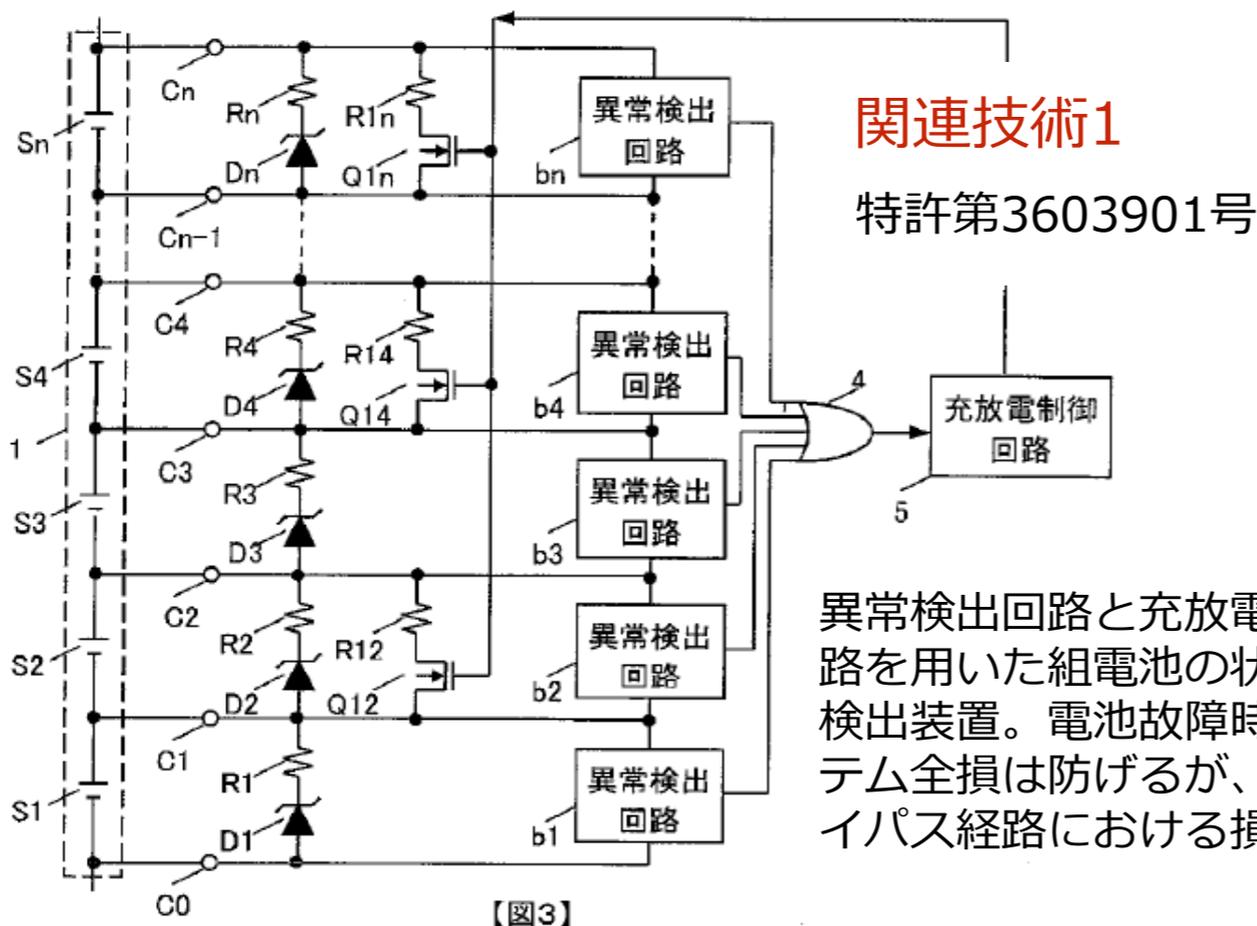
フェイルセーフ設計と類似技術紹介

電源が電氣的に開放状態で故障



提案する故障検出回路

コンパレータを含む故障検出器で電池が開放状態で故障したことを検出し、システム全損を防止。電流バイパス経路に低オン抵抗スイッチングデバイスを用いて損失低減。



回路設計～完成図～



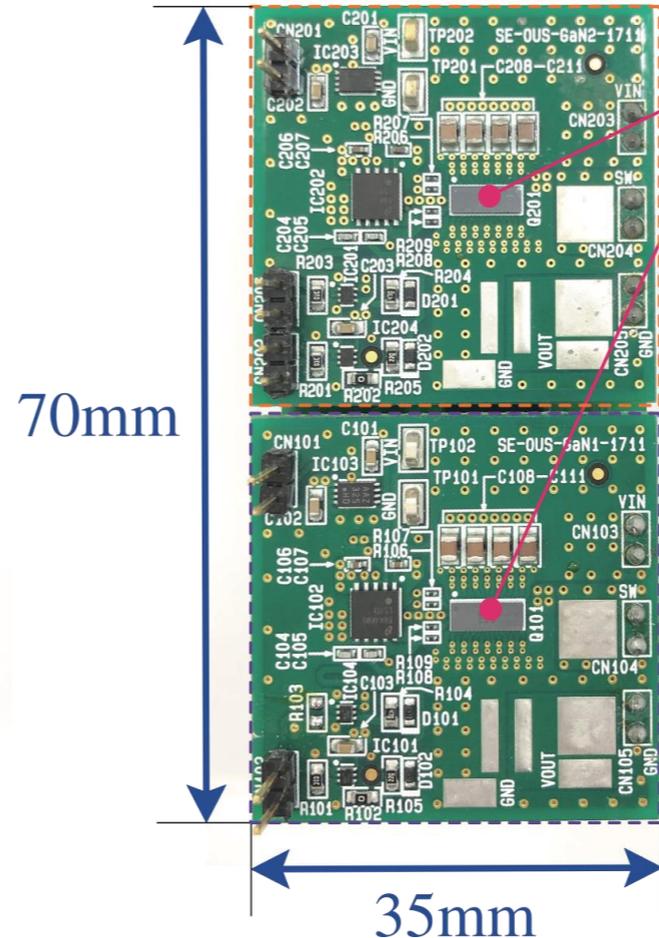
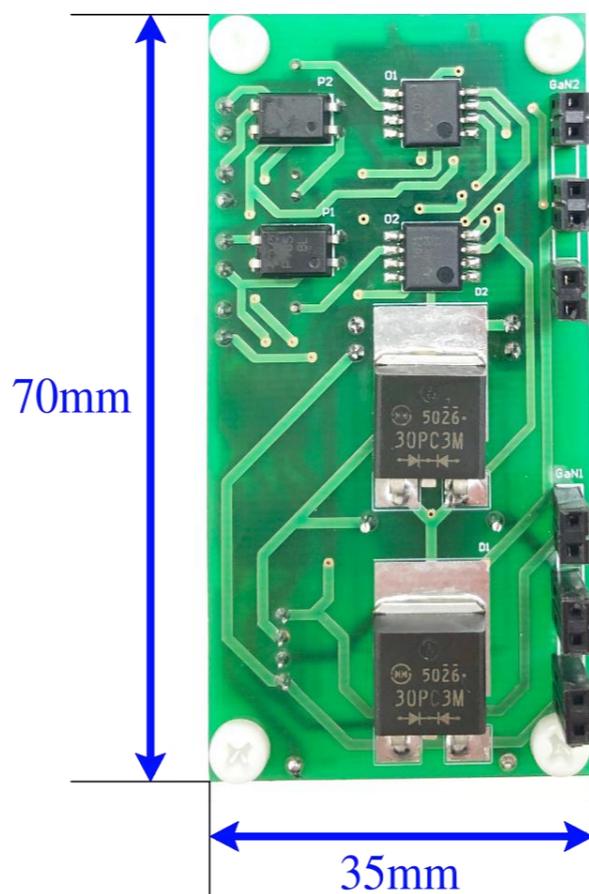
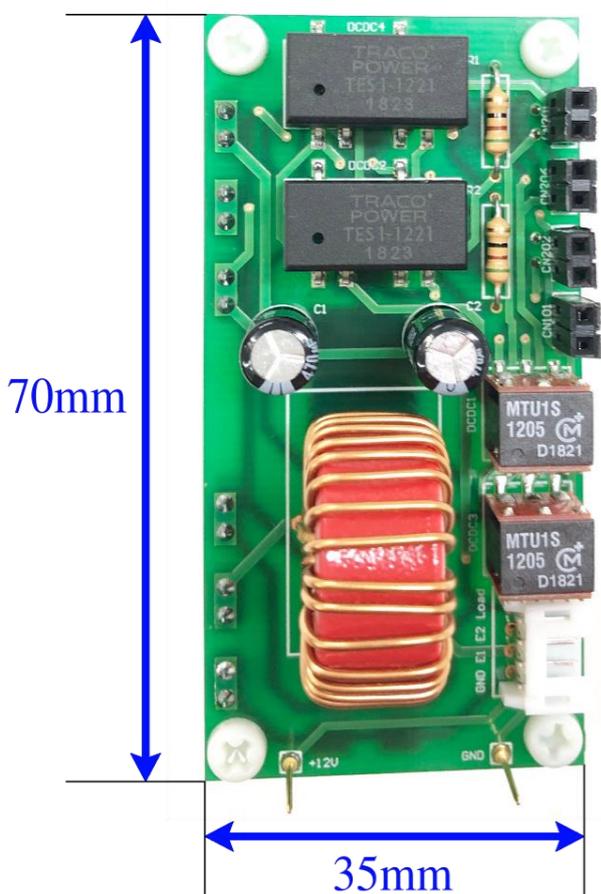
ECOLOGY & GREEN ENERGY

A	B	C	D																																																																																																				
<p style="color:red;">View from Top side (Scale 1:1)</p> <p style="color:blue;">View from Bottom side (Scale 1:1)</p> <p style="color:magenta;">View from Left side (Scale 1:1)</p> <p style="color:green;">View from Right side (Scale 1:1)</p> <p style="color:orange;">View from Front side (Scale 1:1)</p> <p style="color:blue;">View from Back side (Scale 1:1)</p>	<p style="color:red;">Drill Drawing View</p>	<p style="color:blue;">Layer Stack Legend</p> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Material</th> <th>Layer</th> <th>Thickness</th> <th>Dielectric Material</th> <th>Type</th> <th>Gerber</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>Top Paste</td> <td></td> <td></td> <td>Paste Mask</td> <td>GTP</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Top Overlay</td> <td></td> <td></td> <td>Legend</td> <td>GTO</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Top Solder</td> <td>0.01mm</td> <td>Solder Resist</td> <td>Solder Mask</td> <td>GTS</td> </tr> <tr> <td>Copper</td> <td>Top Layer</td> <td>0.04mm</td> <td></td> <td>Signal</td> <td>GTL</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>0.32mm</td> <td>FR-4</td> <td>Dielectric</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Copper</td> <td>Bottom Layer</td> <td>0.04mm</td> <td></td> <td>Signal</td> <td>GBL</td> </tr> <tr> <td>Surface Material</td> <td>Bottom Solder</td> <td>0.01mm</td> <td>Solder Resist</td> <td>Solder Mask</td> <td>GBS</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Bottom Overlay</td> <td></td> <td></td> <td>Legend</td> <td>GBO</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Bottom Paste</td> <td></td> <td></td> <td>Paste Mask</td> <td>GBP</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align:center;">Total thickness: 0.41mm</p>	Material	Layer	Thickness	Dielectric Material	Type	Gerber		Top Paste			Paste Mask	GTP		Top Overlay			Legend	GTO		Top Solder	0.01mm	Solder Resist	Solder Mask	GTS	Copper	Top Layer	0.04mm		Signal	GTL			0.32mm	FR-4	Dielectric		Copper	Bottom Layer	0.04mm		Signal	GBL	Surface Material	Bottom Solder	0.01mm	Solder Resist	Solder Mask	GBS		Bottom Overlay			Legend	GBO		Bottom Paste			Paste Mask	GBP	<p style="color:red;">Drill Table</p> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Symbol</th> <th>Count</th> <th>Hole Size</th> <th>Plated</th> <th>Hole Tolerance</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>□</td> <td>2</td> <td>0.90</td> <td>Plated</td> <td>None</td> </tr> <tr> <td>○</td> <td>10</td> <td>0.80</td> <td>Plated</td> <td>None</td> </tr> <tr> <td>◇</td> <td>4</td> <td>0.60</td> <td>Plated</td> <td>None</td> </tr> <tr> <td>⊗</td> <td>16</td> <td>0.70</td> <td>Plated</td> <td>None</td> </tr> <tr> <td>⊕</td> <td>4</td> <td>3.00</td> <td>Plated</td> <td>None</td> </tr> <tr> <td>◇</td> <td>12</td> <td>0.50</td> <td>Plated</td> <td>None</td> </tr> <tr> <td>☆</td> <td>26</td> <td>0.40</td> <td>Plated</td> <td>None</td> </tr> </tbody> </table>	Symbol	Count	Hole Size	Plated	Hole Tolerance	□	2	0.90	Plated	None	○	10	0.80	Plated	None	◇	4	0.60	Plated	None	⊗	16	0.70	Plated	None	⊕	4	3.00	Plated	None	◇	12	0.50	Plated	None	☆	26	0.40	Plated	None
Material	Layer	Thickness	Dielectric Material	Type	Gerber																																																																																																		
	Top Paste			Paste Mask	GTP																																																																																																		
	Top Overlay			Legend	GTO																																																																																																		
	Top Solder	0.01mm	Solder Resist	Solder Mask	GTS																																																																																																		
Copper	Top Layer	0.04mm		Signal	GTL																																																																																																		
		0.32mm	FR-4	Dielectric																																																																																																			
Copper	Bottom Layer	0.04mm		Signal	GBL																																																																																																		
Surface Material	Bottom Solder	0.01mm	Solder Resist	Solder Mask	GBS																																																																																																		
	Bottom Overlay			Legend	GBO																																																																																																		
	Bottom Paste			Paste Mask	GBP																																																																																																		
Symbol	Count	Hole Size	Plated	Hole Tolerance																																																																																																			
□	2	0.90	Plated	None																																																																																																			
○	10	0.80	Plated	None																																																																																																			
◇	4	0.60	Plated	None																																																																																																			
⊗	16	0.70	Plated	None																																																																																																			
⊕	4	3.00	Plated	None																																																																																																			
◇	12	0.50	Plated	None																																																																																																			
☆	26	0.40	Plated	None																																																																																																			
<p style="color:purple;">Top Overlay (Scale: 1)</p> <p style="color:blue;">Bottom Overlay (Scale: 1)</p> <p style="color:green;">Top Layer (Scale: 1)</p> <p style="color:orange;">Bottom Layer (Scale: 1)</p>	<p style="color:red;">THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF . ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL</p>	<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="2">UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:</td> <td>NAME</td> <td>DATE</td> </tr> <tr> <td colspan="2">DIMENSIONS ARE IN INCH</td> <td>DRAWN</td> <td>2019/01/25</td> </tr> <tr> <td colspan="2">TOLERANCES:</td> <td>CHECKED</td> <td>TITLE</td> </tr> <tr> <td colspan="2">FRACTIONAL ±</td> <td>ENG APPR.</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2">ANGULAR: MACH ± BEND</td> <td>MFG APPR.</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2">TWO PLACE DECIMAL ±</td> <td>Q.A.</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2">THREE PLACE DECIMAL ±</td> <td>COMMENTS:</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2">INTERPRET GEOMETRIC TOLERANCING PER:</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2">MATERIAL</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>NEXT ASSY</td> <td>USED ON</td> <td>FINISH</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2">APPLICATION</td> <td>DO NOT SCALE DRAWING</td> <td></td> </tr> </table>	UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:		NAME	DATE	DIMENSIONS ARE IN INCH		DRAWN	2019/01/25	TOLERANCES:		CHECKED	TITLE	FRACTIONAL ±		ENG APPR.		ANGULAR: MACH ± BEND		MFG APPR.		TWO PLACE DECIMAL ±		Q.A.		THREE PLACE DECIMAL ±		COMMENTS:		INTERPRET GEOMETRIC TOLERANCING PER:				MATERIAL				NEXT ASSY	USED ON	FINISH		APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING		<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>SIZE</td> <td>DWG. NO.</td> </tr> <tr> <td>SCALE: 1:1</td> <td>WEIGHT:</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align:right;">SHEET 1 OF 3</td> </tr> </table>	SIZE	DWG. NO.	SCALE: 1:1	WEIGHT:	SHEET 1 OF 3																																																			
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:		NAME	DATE																																																																																																				
DIMENSIONS ARE IN INCH		DRAWN	2019/01/25																																																																																																				
TOLERANCES:		CHECKED	TITLE																																																																																																				
FRACTIONAL ±		ENG APPR.																																																																																																					
ANGULAR: MACH ± BEND		MFG APPR.																																																																																																					
TWO PLACE DECIMAL ±		Q.A.																																																																																																					
THREE PLACE DECIMAL ±		COMMENTS:																																																																																																					
INTERPRET GEOMETRIC TOLERANCING PER:																																																																																																							
MATERIAL																																																																																																							
NEXT ASSY	USED ON	FINISH																																																																																																					
APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING																																																																																																					
SIZE	DWG. NO.																																																																																																						
SCALE: 1:1	WEIGHT:																																																																																																						
SHEET 1 OF 3																																																																																																							
A	B	C	D																																																																																																				

実装回路

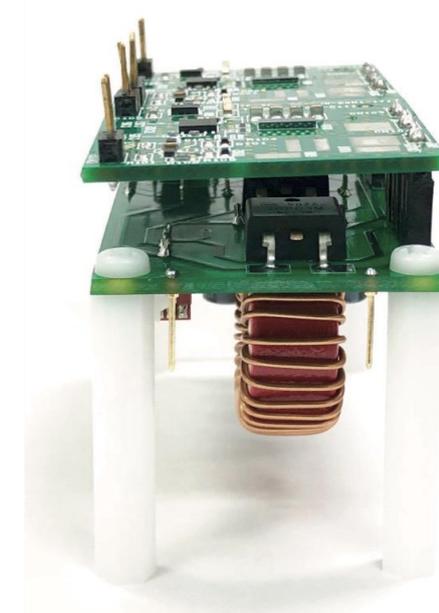


ECOLOGY & GREEN ENERGY



GaNスイッチングデバイス

同期整流型GaNスイッチ回路



Schematic図、PCB図の手順で設計し、最終的には70mm×35mm（25cm²程度）で回路実装。目標とする実装面積50cm²を達成。同期整流型GaNスイッチ回路およびコンデンサ・パイルアップ回路は統一化実装可能であり、故障検出回路の最適化実装も含めて更なる小型化が可能な見込み。



各種スイッチ回路実装資料

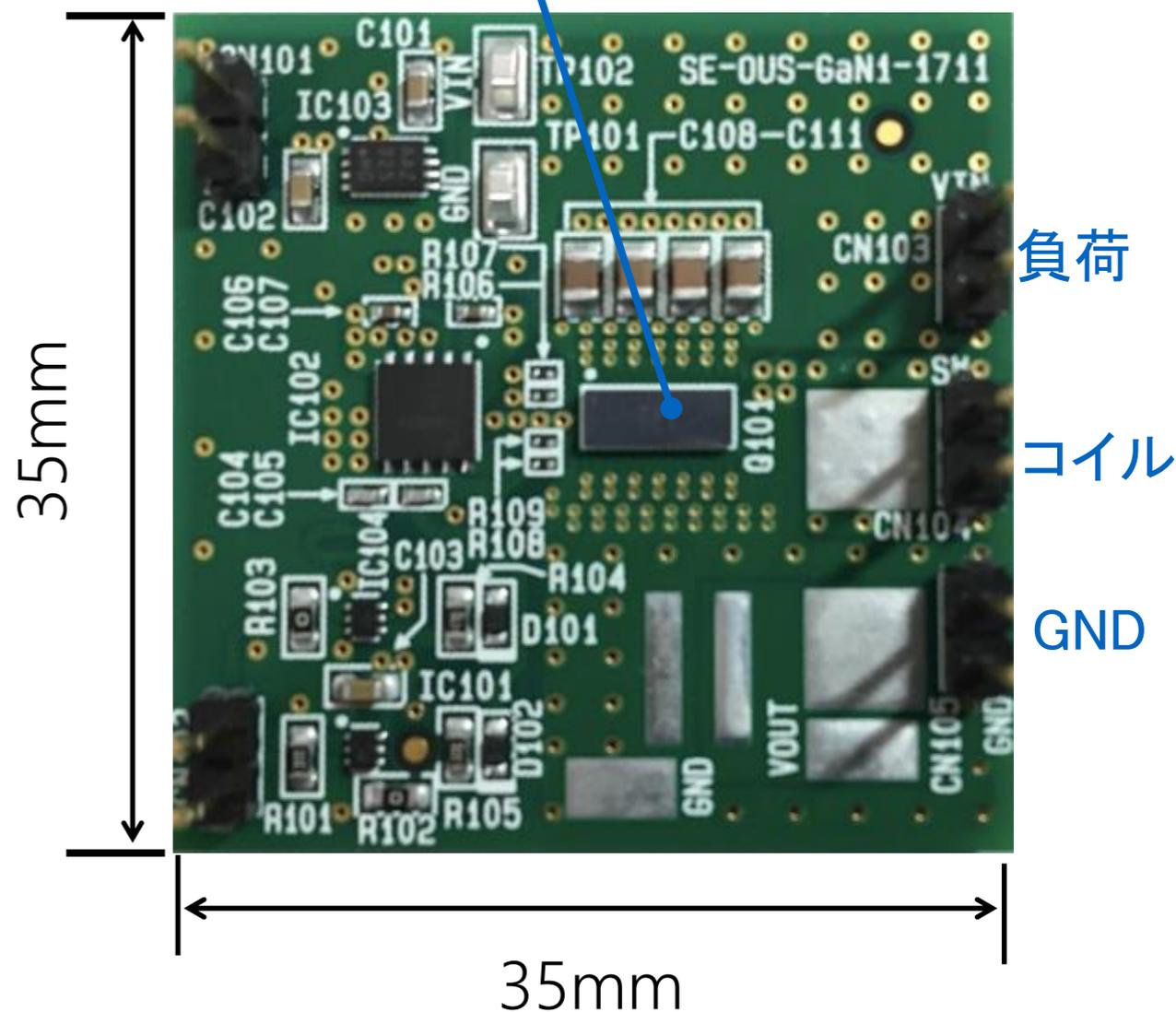
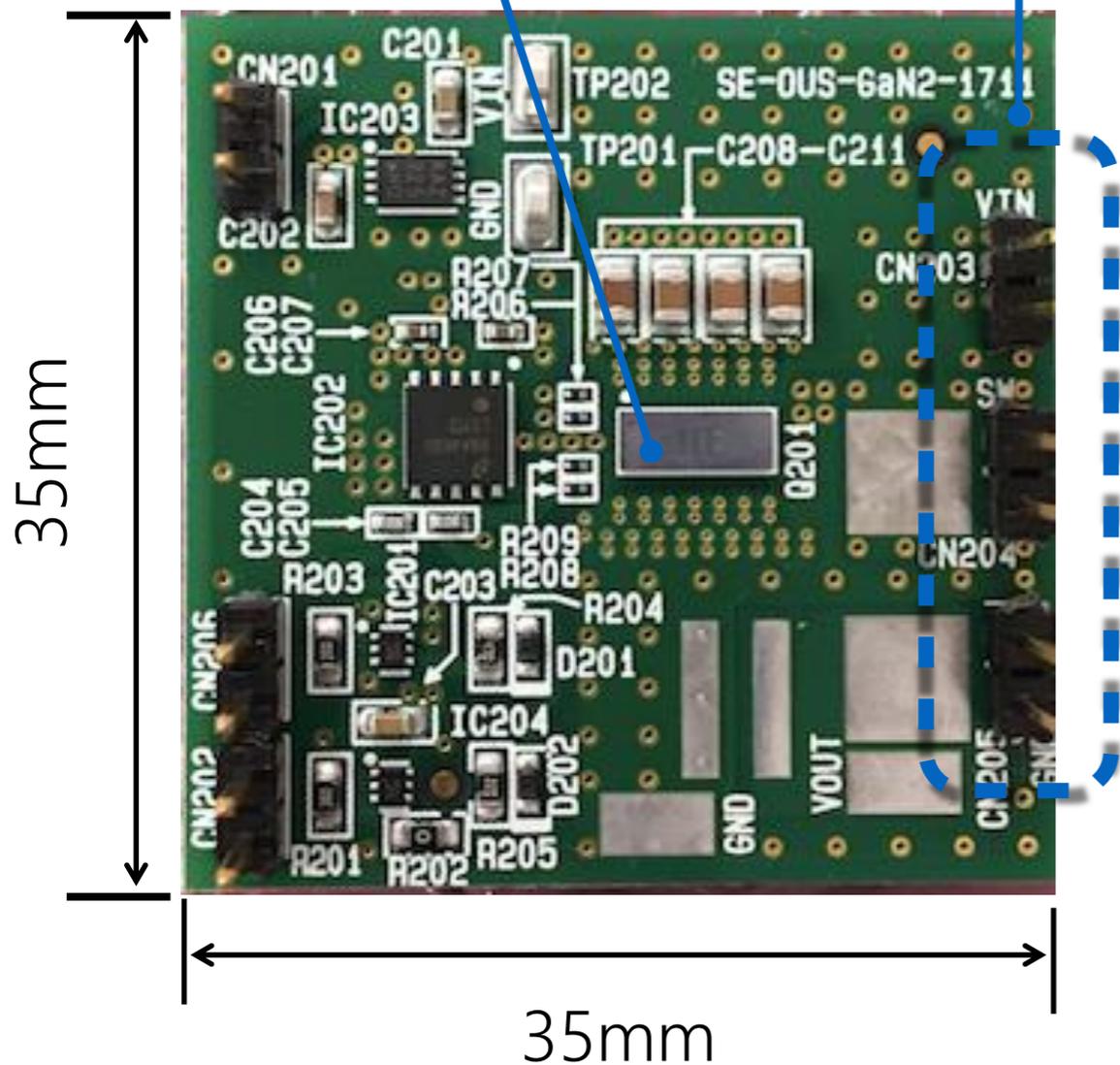
フォールトトレラント回路

同期整流型スイッチ回路

DC-DCコンバータへの接続ピン

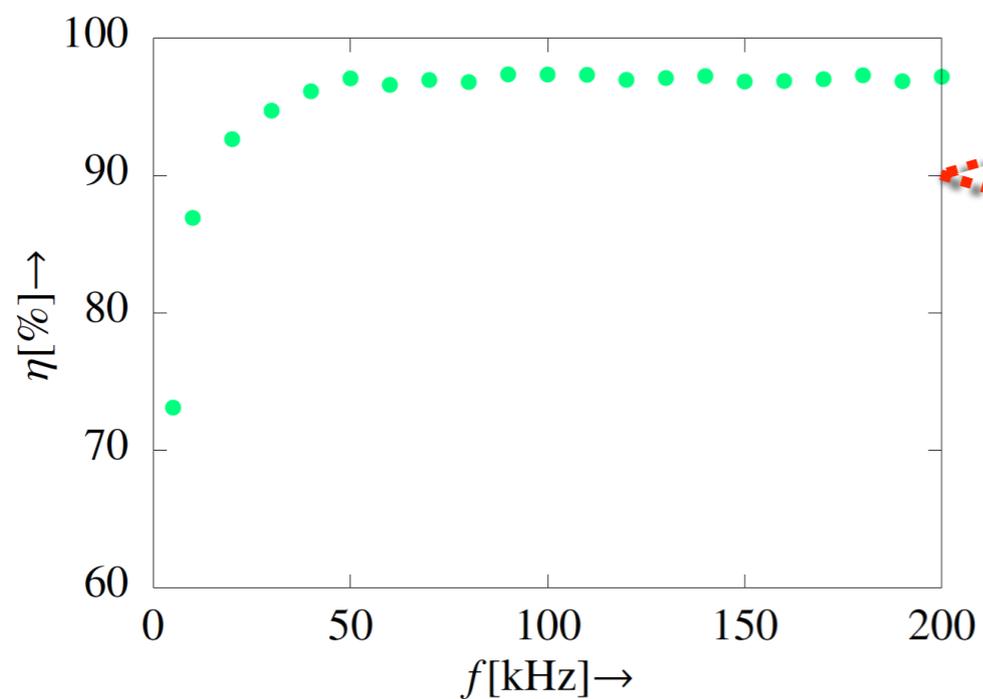
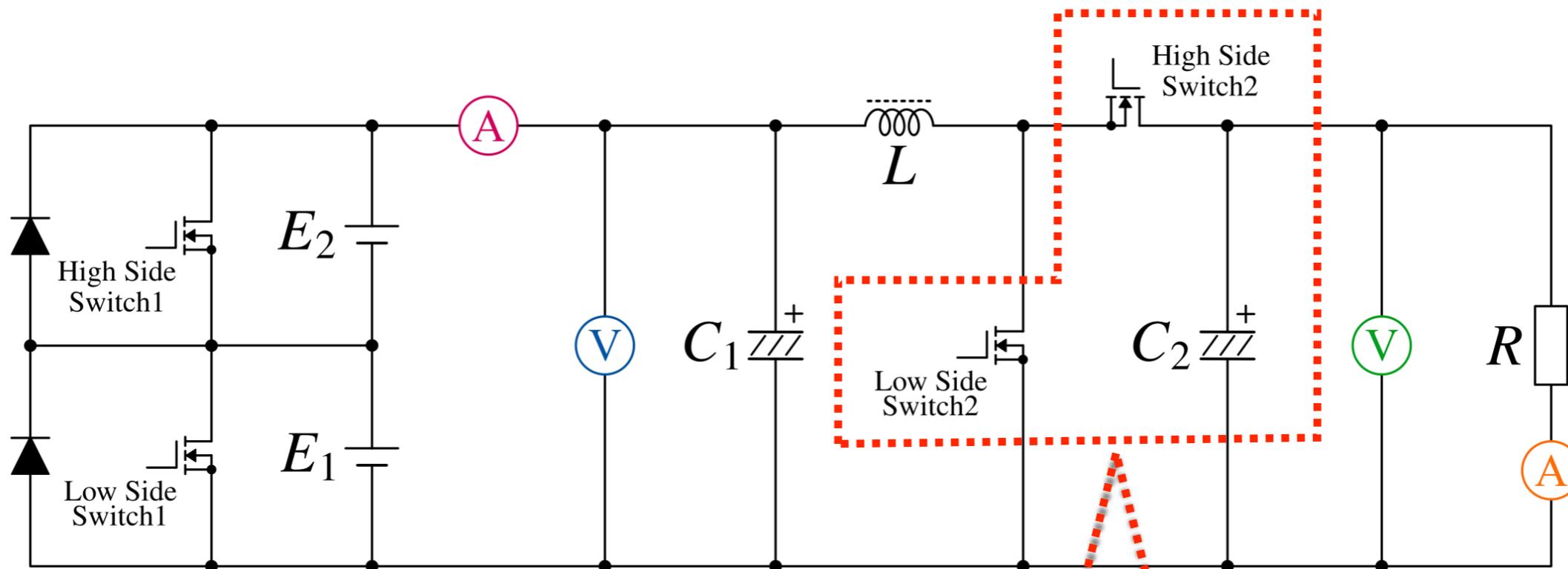
GaNスイッチングデバイス

GaNスイッチングデバイス

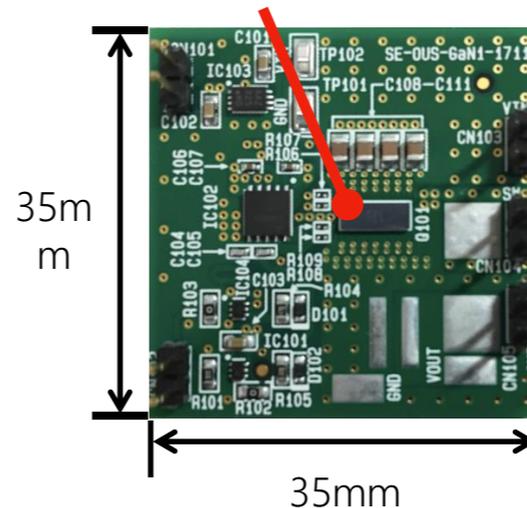




実験結果 (電力変換効率の確認)



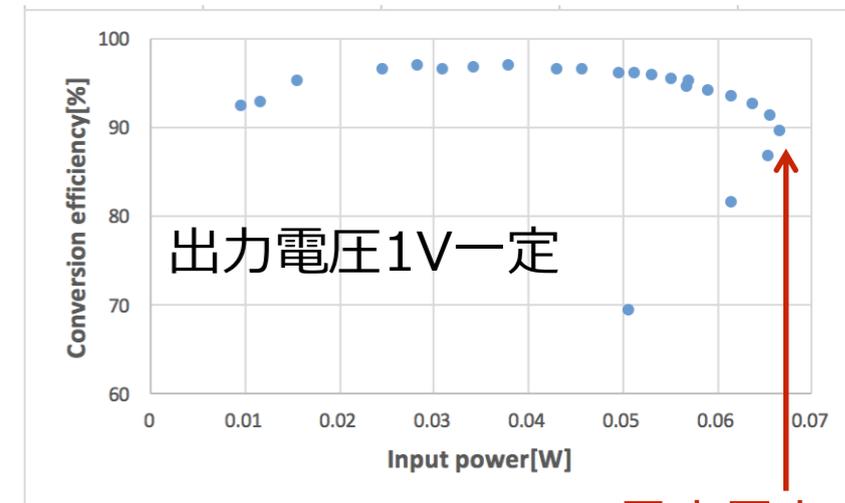
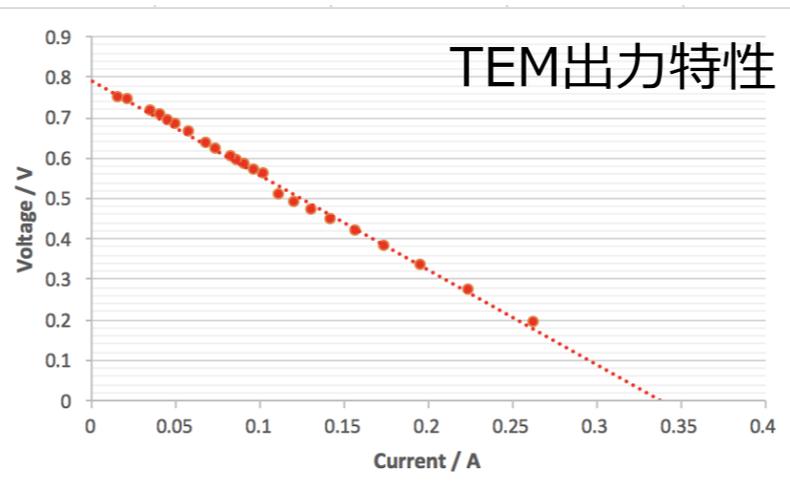
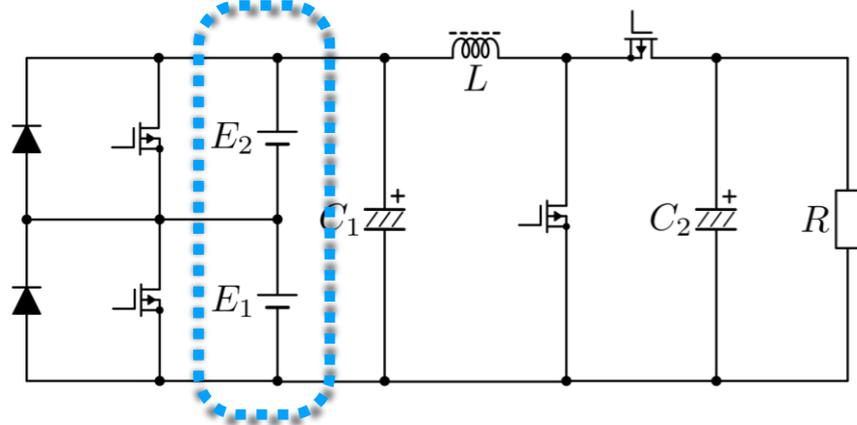
GaNスイッチングデバイス



GaNスイッチングデバイスを使用しているため、スイッチング周波数が低い場合、電力変換効率が低下する。スイッチング周波数は十分に高いことが望ましいが、マイコンを用いた制御を考慮すると100kHz程度？

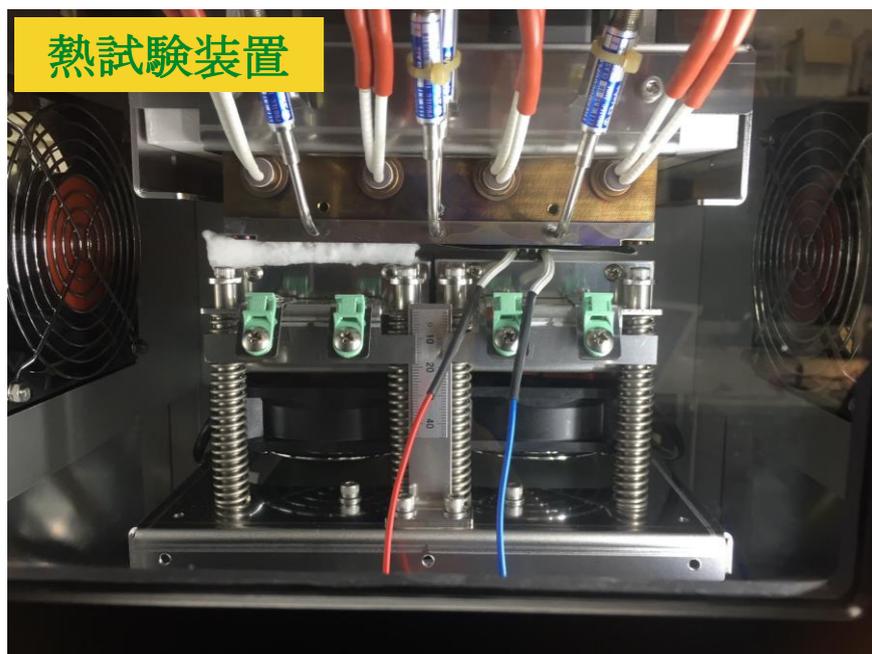


実験結果 (電力変換効率の確認)

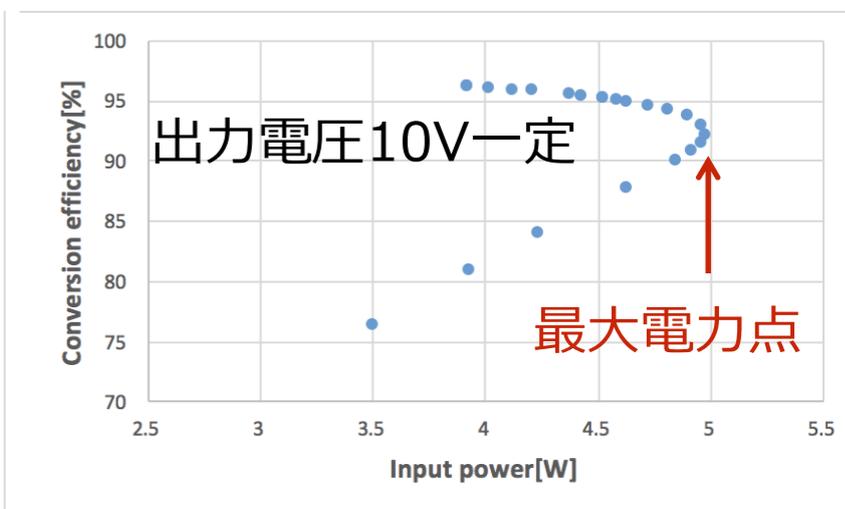
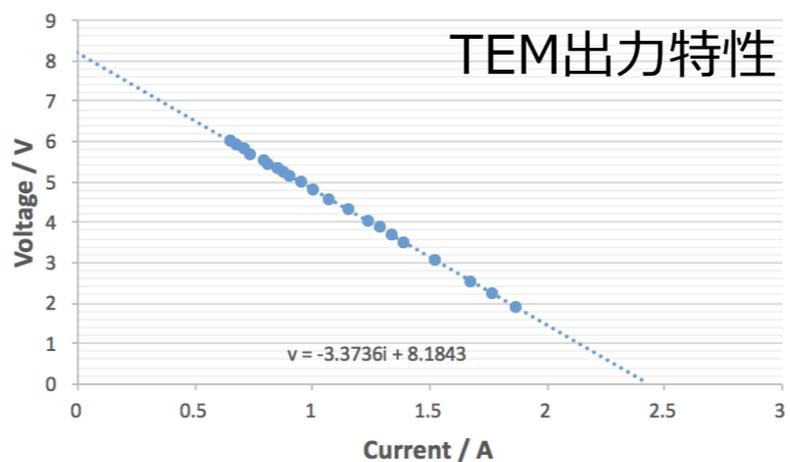


(a) 温度差50°C

最大電力点



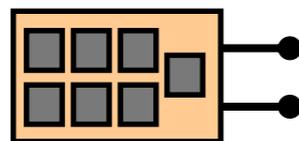
熱試験装置



(b) 温度差280°C

最大電力点

KELK社製熱電発電モジュールを使用

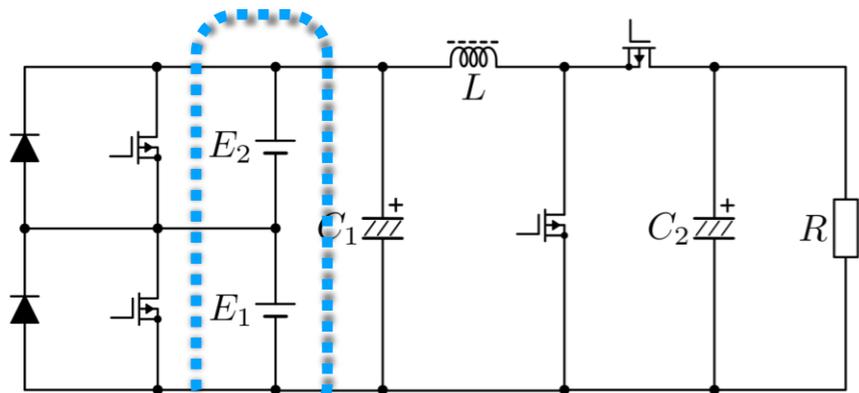


$$L = 75[\mu H] \quad C_1 = C_2 = 470[\mu F]$$

KELK社製熱電発電モジュールを温度差50°Cまたは温度差280°Cで使用。最大電力点で変換効率90%以上を確認。

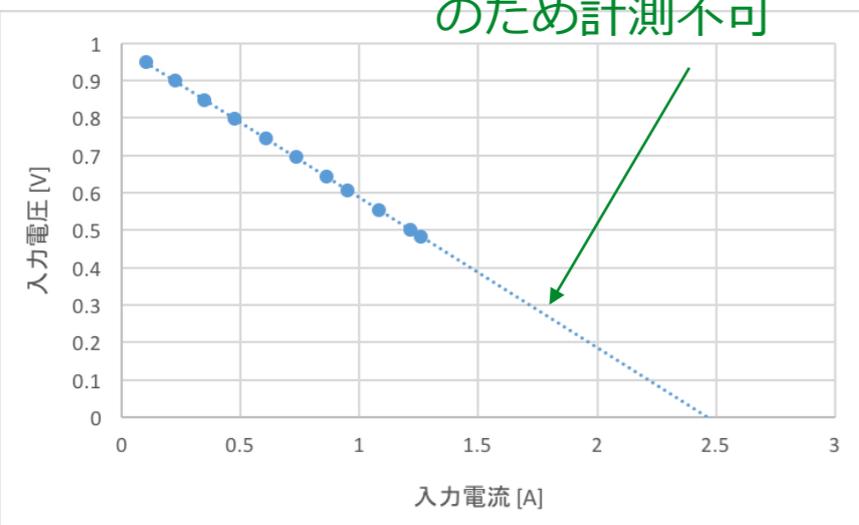


実験結果 (電力変換効率の確認)



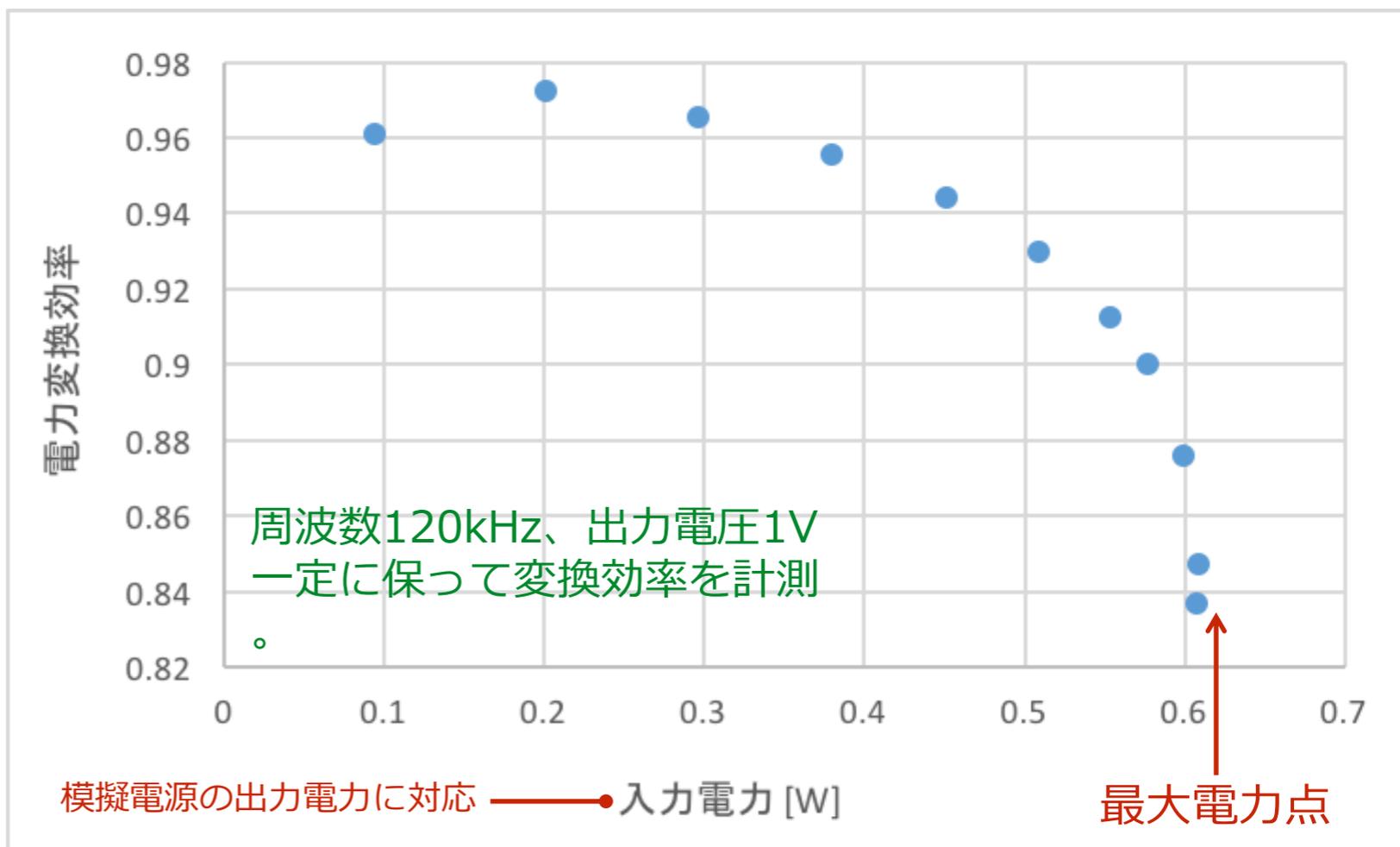
模擬電源

Duty比80%の制約のため計測不可



高電流出力タイプのフラウンフォーファース社製熱電発電モジュールを使用

$$L = 75[\mu H] \quad C_1 = C_2 = 470[\mu F]$$

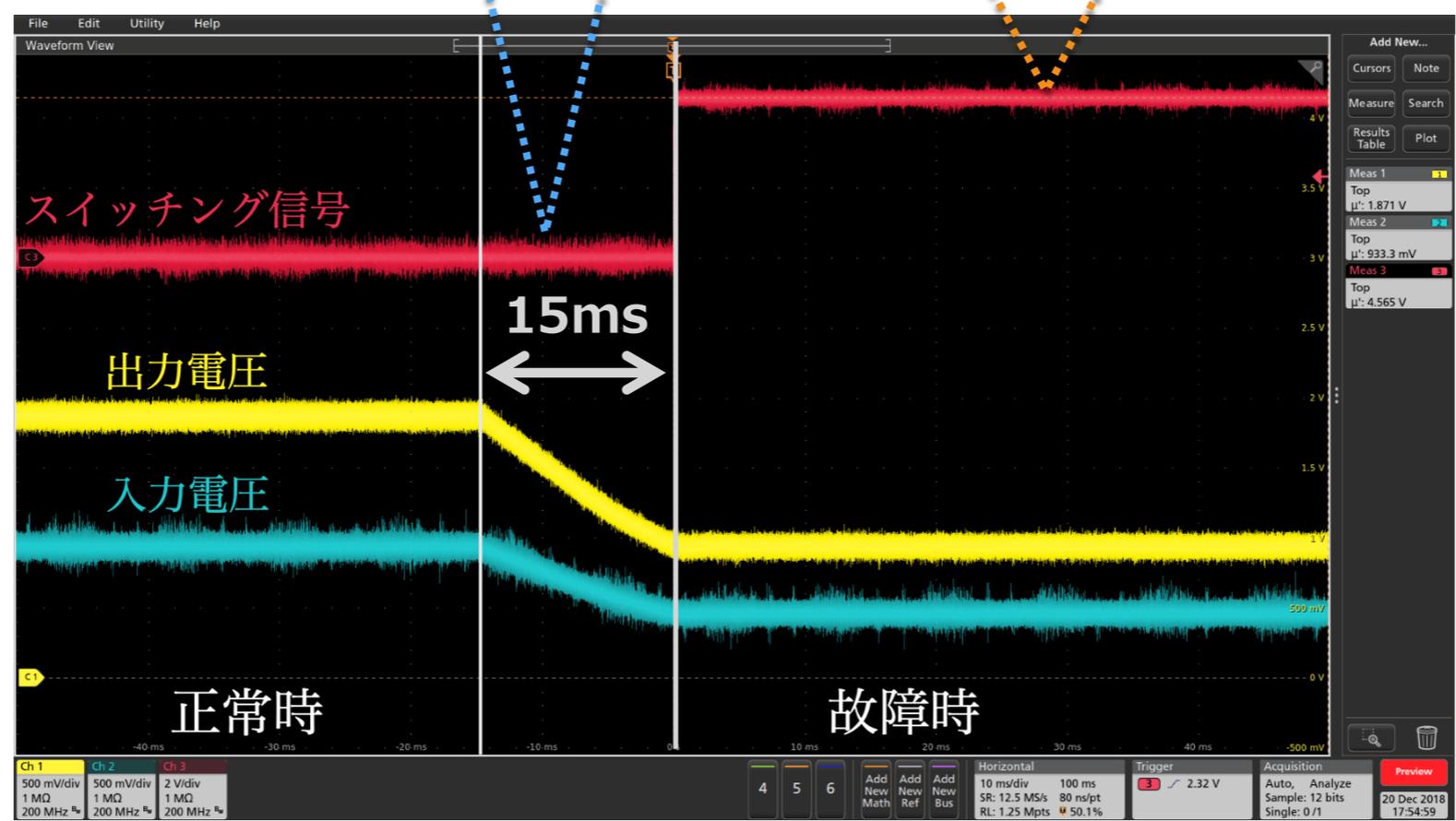
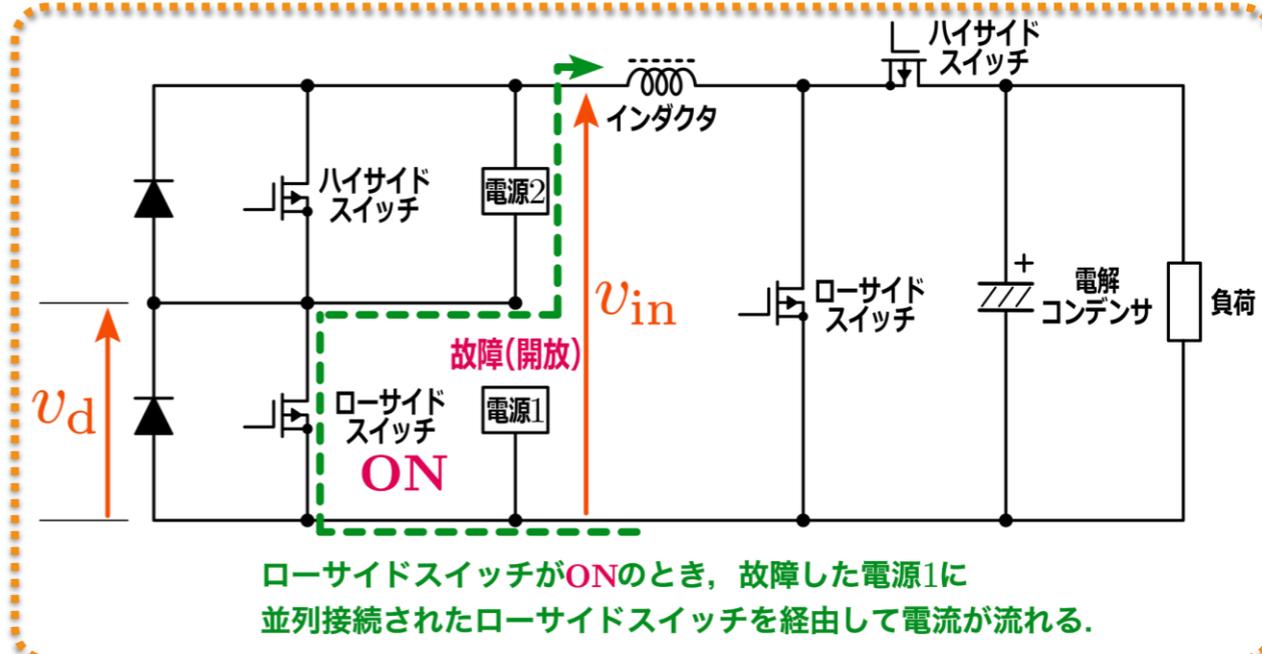
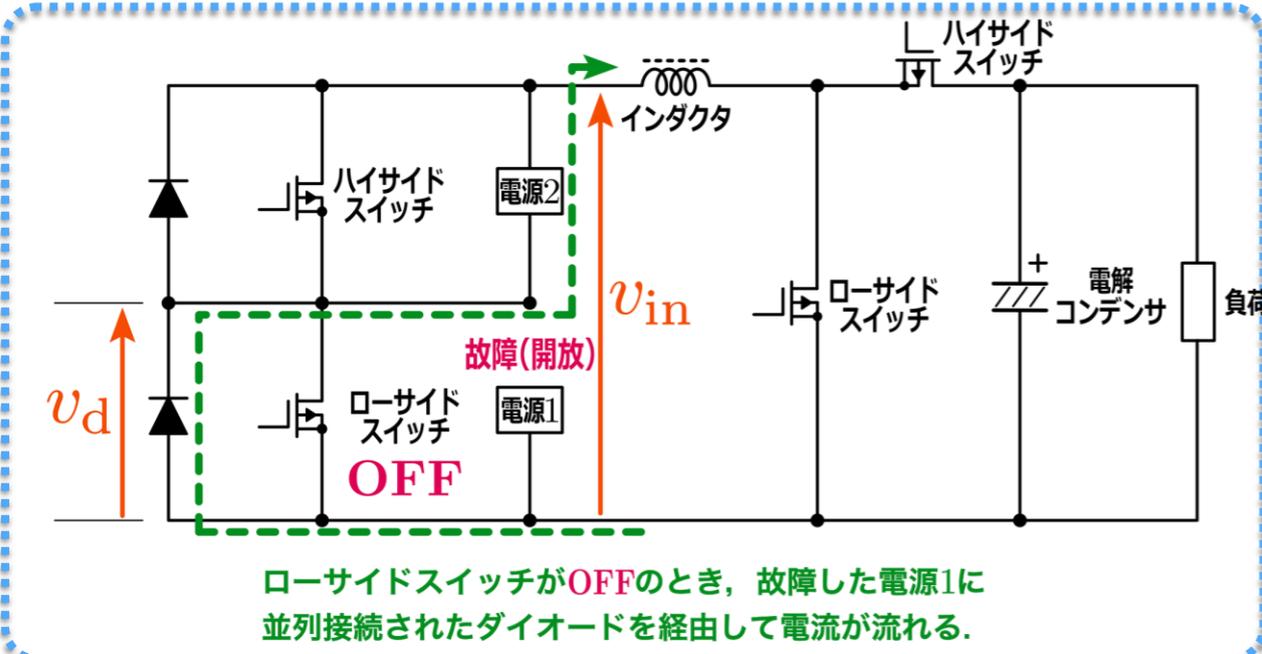


KELK社製熱電発電モジュールと比較して、高電流出力特性が強いフラウンフォーファース社製熱電発電モジュールの模擬電源を電源に使用して、コンデンサ・パイルアップ型コンバータの電力変換効率を測定。出力電流値が高いため変換効率はKELK社製熱電発電モジュール使用時と比較して低下傾向にあるが、最大電力点付近で変換効率80%以上を確認。



電源故障時動作検証と電力変換効率

ECOLOGY & GREEN ENERGY



企業への期待



ECOLOGY & GREEN ENERGY

- ・ センサー等の独立駆動電源、工場等での排熱発電、
自動車の回生発電に関するシステムの製品化を行う
企業にとって有効な研究であると考えています。

本技術に関する知的財産権



ECOLOGY & GREEN ENERGY

発明の名称：電池装置、故障監視システム、及び

電池の電圧出力方法

出願番号：特願2018-067841

出願人：岡山理科大学、東京理科大学

発明者：麻原寛之、飯田努



熱電用電力変換回路のフォールト・トレラント設計

『熱電池専用DC-DCコンバータ』

- **熱電池**へ接続する回路仕様
- **フォールトトレラント**(フェイルセーフ)設計
- **低損失**回路動作の検証

この研究は
東京理科大学 基礎工学部 材料工学科の飯田努 教授
との共同研究で実施しています。

