

# 燃料電池の長期使用における特性変化とハザードの分析

米山 崇\* 小川 賢一\* 長谷川 均\*  
山本 貴光\*\*

## Characteristic Change and Hazard Analysis of Fuel Cells in Long Time Use

Takashi YONEYAMA Kenichi OGAWA Hitoshi HASEGAWA  
Takamitsu YAMAMOTO

The durability is important when fuel cells are used for the railway vehicles. So, we made a test railway vehicle powered by 100 kW-class fuel cells and have carried out experimental running tests for 10 years on our test track. The results show that the output voltage of the fuel cells decreases by 5% in comparison with the voltage at the time of the start of the experiment. On the other hand, the energy conversion efficiency of the fuel cells maintained approximately 50%. And, we conducted analysis of the hazards that might cause harm by the components of the fuel cell system. We revealed that the items which need improvement and formulated a guideline for the development of our new fuel cell system.

キーワード：燃料電池，劣化，電圧，効率，リスクアセスメント

### 1. はじめに

燃料電池は水素を燃料として発電を行うクリーンな電源として注目されており，将来的に鉄道車両の電源としても利用される可能性がある。燃料電池を鉄道車両へ適用する場合，長期使用による燃料電池の特性の変化（劣化）を事前に把握しておくことが重要である。そこで，100kW級燃料電池を搭載した試験車両<sup>1)</sup>により10年にわたり燃料電池の発電電圧，水素の持つエネルギーを電気エネルギーに変換する際の効率の評価を行った。また，燃料電池を構成する部品について，経年劣化や偶発的に発生する不具合を対象として，ハザード（危険）とその発生頻度からリスクアセスメントを行い，改善が必要な項目を抽出し，信頼性を向上させるなど，今後，燃料電池を製作する際の指針を得ることができた。本稿ではその結果について報告する。

### 2. 燃料電池の性能と劣化

100kW級燃料電池を搭載した試験車両の所内走行試験により，約10年にわたり燃料電池の発電性能の評価を行い，燃料電池の出力電圧やエネルギー変換効率の変化について確認を行った。本章ではこれらの結果について述べる。

\* 車両制御技術研究部 水素・エネルギー研究室

\*\* 車両制御技術研究部

### 2.1 燃料電池の発電のしくみ<sup>2)</sup>

固体高分子形の燃料電池は，図1に示すように負極に水素，正極に酸素を供給すると，水の電気分解の逆の反応により電力を取り出すことができる発電装置であり，負極・正極ではそれぞれ以下の電気化学反応が生じている。



式(1)の反応において水素が電子を生成する酸化反応と，式(2)の反応において水が生成される還元反応には，それぞれ触媒として白金が関与しているが，白金は希少金属であるため，使用量を極力少なくすることや，周囲の環境・状況により触媒層が劣化しないことが望ましい。

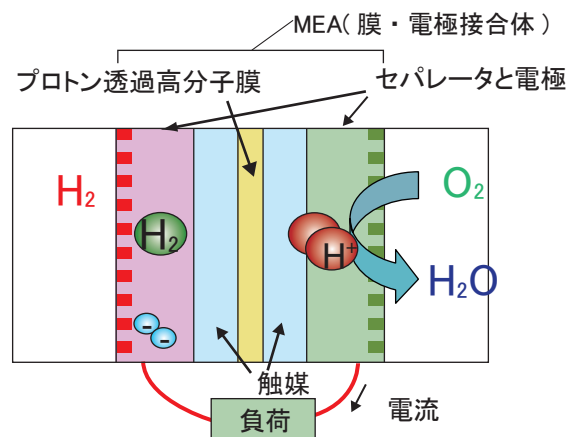


図1 燃料電池の発電のしくみ

特集：車両技術

また、触媒の働きにより発生した電子は導電性の物質の中しか通過できず、一方、水素イオン（H<sup>+</sup>、プロトンともいう）はイオン導伝性の物質の中しか通過できないという性質を持っている。

そこで、燃料電池の触媒層は図2に示すように、導電性のある炭素の粉末に、触媒である白金を微小な粒子として付着させ、さらにイオン導伝性の物質を付着させている。燃料電池による発電の際には、図2に示すように水素分子は触媒に触れて水素イオンと電子に分かれ、発生した水素イオンはイオン導伝性物質と高分子膜を通り抜け、電子は導電性の炭素の中を通り、導電性のセパレータを介して電極へ達する。このため触媒層の中の水素の流路、触媒、炭素、イオン導伝性の物質のいずれが欠けても燃料電池は発電することができない。

なお、実際の固体高分子形燃料電池では、高分子膜・触媒・電極などを1枚に圧着したMEA（Membrane Electrode Assembly, 膜電極接合体）とよばれるシート状のものを採用していることが多い。

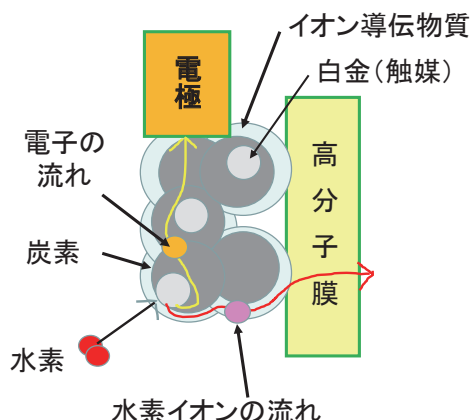


図2 燃料電池の触媒層の働き

2.2 燃料電池の劣化のしくみ<sup>2)</sup>

図3に燃料電池の劣化の例を示す。炭素の表面に付着している触媒の白金は、表面積が広い方が利用率が高まり、燃料電池の発電反応に有利である。このため、白金を微小な粒子状にしたものを触媒層に分布させている

が、この白金の粒子同士が凝縮して粒径が増加してしまうと、触媒表面積が減少する。この場合、反応速度が低下して、発生電圧が低下してしまう。また、白金が付着しているカーボンの腐食により、白金が流出し触媒表面積が減少することでも、発生電圧が低下してしまう。この他に、燃料電池の内部に使用されているMEAは、本来水素イオン（H<sup>+</sup>）は透過させるが、水素や電子は通過させない性能を持っている。しかし、一部の水素が水素イオンに変化しないままMEAを通過してしまい、陽極側（酸素極側）で触媒の働きにより酸素と反応（局部的燃焼）してしまう現象があり、これをクロスオーバーという。クロスオーバーの発生は、水素が発電に寄与せずに消費されることから、燃料電池のエネルギー変換効率を低下させる劣化現象の一つであるだけでなく、発火現象に至る可能性があるため、ハザード要因として注意が必要である。

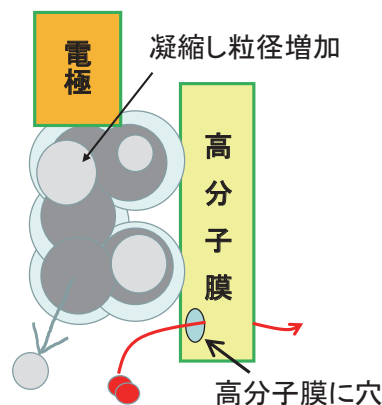


図3 燃料電池劣化の例

2.3 100kW級燃料電池の出力電圧の測定<sup>3)</sup>

100kW級の固体高分子形燃料電池（以下、100kW級燃料電池）の性能測定を燃料電池・バッテリーハイブリッド試験電車の走行試験により行った。主回路構成図を図4に示す。100kW級燃料電池の外観を図5、主な仕様を表1に示す。この車両には燃料電池の他に回生エネルギー吸収用のバッテリーを搭載しているため、回生ブ

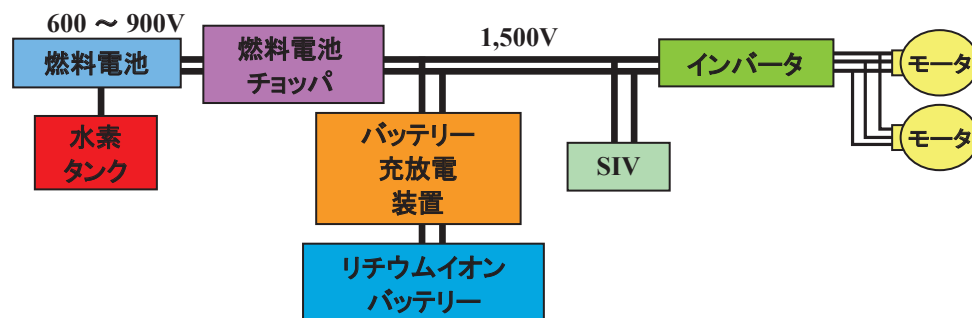


図4 燃料電池・バッテリーハイブリッド主回路構成



図5 100kW級燃料電池の外観

表1 100kW級燃料電池の仕様

最大出力	120 kW (Net)
燃料	純水素
酸化剤	空気
出力電圧	900V (無負荷時) ～ 600V (最大負荷時)
起動時間	90 秒
質量	1850 kg
外形寸法	1.65 (L) × 1.25 (W) × 1.50 (H) m

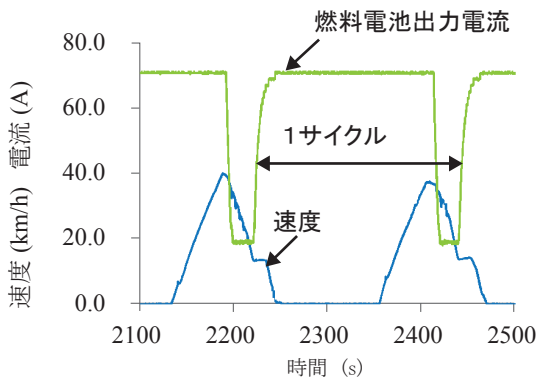


図6 燃料電池の負荷パターンの例

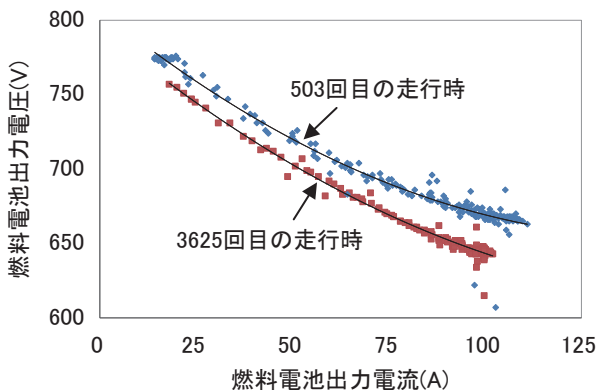


図7 100kW級燃料電池の電流電圧特性

表2 劣化評価に使用する燃料電池の運転点

項目	条件
出力電流	95 ～ 100 [A]
電池温度	66 ～ 70 [°C]
吸気温度	47 ～ 53 [°C]
排気温度	55 ～ 60 [°C]

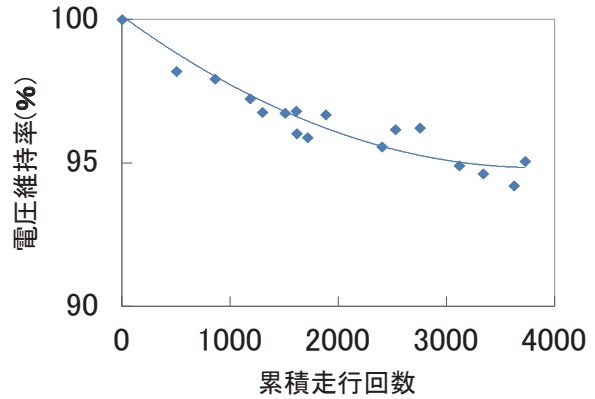


図8 累積走行回数との電圧維持率の関係

レーキ動作時の一時的なアイドル状態を除き、燃料電池出力はほぼ一定の出力となるよう制御しており(図6)、過不足の電力はバッテリーによって吸収・供給されている。

試験電車にて所内走行試験(累積走行回数 3,650 回程度、累積走行距離 2,270km、燃料電池起動回数 165 回程度)を行った。燃料電池の電流電圧特性(I-V 特性)の測定結果を図7に示す。図7中に示す走行回数は、図6において燃料電池の高出力運転とアイドル運転がそれぞれ1回行われることを1サイクルとし、この回数(累積走行回数)を示している。図7より、評価期間の初期と比較して、負荷領域全般に渡って発電電圧が低下していることが分かる。また、表2の運転点における電圧測定結果(図8)より、劣化評価を開始した時点から、約5%の出力電圧低下がみられ、徐々に劣化していることが認められる。

#### 2.4 100kW級燃料電池のエネルギー変換効率<sup>3) 4)</sup>

次に、燃料電池が水素の持つエネルギーを電気エネルギーに変換する際のエネルギー変換効率の測定を行った。ここで、エネルギー変換効率を

$$\text{エネルギー変換効率} [\%] = \frac{\text{燃料電池の外部出力エネルギー} [\text{kWh}]}{\text{消費した水素のエネルギー} [\text{kWh}]} \times 100 \quad (3)$$

と定義する。なお、燃料電池の外部出力エネルギーは燃料電池の外部出力電圧・電流の積、消費した水素のエネルギーは水素タンクの圧力・温度から求められる。

走行試験により測定したデータから、燃料電池のエネルギー変換効率を計算した結果を図9に示す。これまでの走行試験では52%程度を維持していることから、効

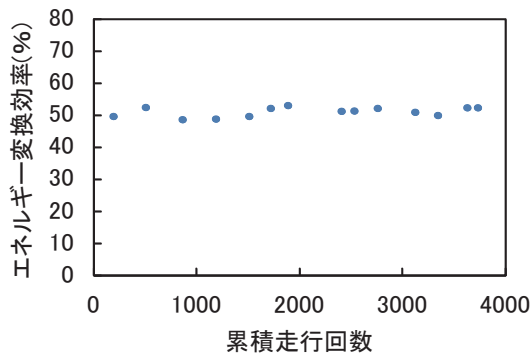


図9 累積走行回数とエネルギー変換効率

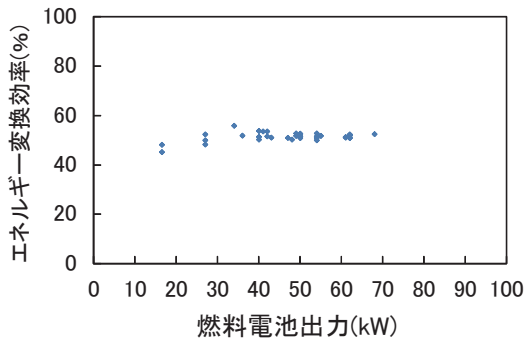


図10 外部出力とエネルギー変換効率

率へ影響を及ぼすほどのクロスオーバーは発生していないことが確認できる。

次に、100kW級燃料電池の出力を変化させ、燃料電池の外部出力・エネルギー変換効率特性（図10）を得た。この際、燃料電池の出力は図4の燃料電池チョップが制御しているため、燃料電池チョップの通流率を変化させることで、図6の燃料電池出力電流を変化させることができる。図10より、低出力領域を除いて、走行試験で使用する出力領域の範囲ではほぼ50%程度の効率が得られていることから、最高効率点に限定しなくとも、本走行試験で使用する出力範囲ではエネルギー変換効率の良い運転ができることが分かった。なお、この燃料電池は外部出力が0（アイドル運転）であっても自身の運転に必要なエアブローや冷却装置などの周辺機器の電力も自ら発電し燃料を消費しているため、外部出力が低い領域では効率が低下する。また、15kW未満または70kW以上の領域で一定負荷運転を行おうとすると、バッテリーの過放電・過充電状態が発生し、効率計算をするのに十分な時間の継続運転を行えないためデータを掲載していない。

2.5 100kW級燃料電池の性能と劣化のまとめ

100kW級燃料電池を電源とする燃料電池・バッテリーハイブリッド試験電車にて所内走行試験を行い、燃料電

池の発生電圧を測定したところ、評価開始時から比較して5%程度の低下が見られるものの、燃料電池のエネルギー変換効率は約50%を維持して変わっておらず、運転継続不能となるような性能低下・故障は発生していないことを確認した。

3. 100kW級燃料電池のリスクアセスメント<sup>5)</sup>

今後製作する燃料電池システムの安全性・信頼性向上のため、100kW級燃料電池を構成する部品について、長期に渡って使用することによる経年劣化や偶発的に発生する不具合を対象とし、これまでの不具合実績等を元に、ハザード（危険）とその発生頻度からリスクアセスメントを行い、信頼性の向上、改善が必要な項目を抽出した。

3.1 リスクアセスメントについて

リスクアセスメントとは、人や物に被害を与えるハザード（危険）を抽出し、その危険度を推定する手法である。ハザードについては、データや経験によってハザードの発生頻度を推定し、リスク（＝ハザードの危険度×発生頻度）を計算することで推定評価することとされている。この推定評価はリスクが、ハザードによる被害の大きさとハザードの発生する頻度の積で表されるという視点に立って実施される。

3.2 検討対象

本検討では、100kW級燃料電池を構成する部品について、経年劣化や偶発的に発生する不具合を対象とし、初期不良・設計不良を除いて、分析を行った。その際、装置にハザードを回避する「検出装置」がない場合にどのような被害が考えられるかを「対策前リスク」とし、有効な「検出装置」を設置した場合の「対策後リスク」と比較した。なお、リスクアセスメントは、水素供給系、空気供給系、冷却系、スタック、制御・電源系に分けて系統ごとを実施した。

3.3 ハザードの危険度ランクと発生頻度ランク

ハザードの発生頻度と、危険度については、表3、表4の分類で行うこととし、ハザードを検出し警報・保護動作を行う検知装置を設置する前と設置した後で発生する被害を比較した。

これにより、ハザード事象は表5のように分類することができ、これを経済産業省の「リスクアセスメント・ハンドブック<sup>6)</sup>」に基づき、×：許容できない（改善が必要）、△：許容できるが改善が必要、○：危険がない、の3段階で評価した。

表3 発生頻度ランクの定義

発生頻度 ランク	分類
1	まずありえない
2	寿命期間内で1回程度発生する
3	寿命期間内で複数回発生する
4	1～2年に1度程度発生する
5	1年に複数回発生する

表4 危険度ランクの定義

危険度 ランク	分類
I	危険なし
II	機器内での損傷 (小)
III	機器内での故障 (大)
IV	機器外への損傷 (小)
V	機器外への損傷 (大)

表5 ハザード事象の評価基準

		発生頻度				
		1	2	3	4	5
危害の 程度	V	△	×	×	×	×
	IV	△	△	×	×	×
	III	△	△	△	×	×
	II	○	△	△	△	×
	I	○	○	△	△	△

3.4 リスクの分析

100kW 級燃料電池のハザードは 137 件存在し、系統別のハザードの状況は冷却系 40 件、水素供給系 35 件、制御・電源系 35 件、空気供給系 16 件、スタック 11 件であった。また、装置にハザードを回避する「検出装置」がない場合にどのような被害が考えられるかを想定した「対策前リスク」と、「対策後のリスク」と比較した（「対策後リスク」には「対策前リスク」の一部が未対策のままである場合も含んでいる）。検討結果の例を表6に示し、検出装置設置等を行う前の「対策前」と「対策後」の燃料電池のリスクランクを表7に示す。表7より「対策前」の許容できないハザードは13件であったが、検出装置の設置等による対策により4件まで減らすことができた。ただし、これらの検知はセンサによって行われているものがほとんどであり、センサ故障時には、センサからの出力を異常値（例 正常時は1～4[V]の出力、異常時は0または5[V]を出力）とすることなどにより、制御装置がセンサ故障を検知できることが信頼性確保の上で必要である。

残っている許容できないハザード4件の発生箇所を図11に、概要を表8に示す。これら4件はいずれも単一部品の故障で爆発または漏電という大きな被害をもたらす可能性がある。今後製作する燃料電池では改善案を施

表6 100kW 級燃料電池のリスクアセスメントの例

系統	危害シナリオ	対策前			対策	現状		
		頻度	被害	評価		頻度	被害	評価
水素	車両の振動により配管接続部のねじが緩み水素漏洩	3	V	×	水素センサ設置	3	I	△
空気	フィルタが目詰りし空気供給量が減り発電電圧低下	2	I	○	圧力・電圧センサ設置	2	I	○
スタック	燃料電池触媒層の撥水性が低下し水素供給を阻害	2	II	△	電圧センサ設置	2	I	○
制御	電子基板をソフトウェアが検出できず起動不能	4	I	△	制御装置に検知・保護機能	4	I	○

表7 100kW 級燃料電池のリスクランク

(a) 対策前

		発生頻度				
		1	2	3	4	5
危害の 程度	V	18	6	1	2	0
	IV	3	1	0	0	0
	III	20	22	5	1	3
	II	7	12	6	3	0
	I	10	9	3	4	1

(b) 対策後

		発生頻度				
		1	2	3	4	5
危害の 程度	V	10	3	0	1	0
	IV	0	1	0	0	0
	III	1	1	0	0	0
	II	2	9	3	1	0
	I	45	36	12	8	4

凡例 □ 危険がない ■ 許容できるが改善が必要 ■ 許容できず改善が必要

特集：車両技術

すことで、これらの危険を回避するようにすることが必要である。この他、許容できるが改善が必要な項目についても、感電・発火・爆発等、大事故につながる可能性のある事柄については優先的に改善していく必要がある。

また、表6の制御の項目にあるように、ソフトウェアやハードウェアの一時的な不具合により、起動できない、異常停止するという事例も発生している。燃料電池や補機の部品だけでなく、ソフトウェアや基板類の信頼性向上も重要である。

3.5 リスクアセスメントのまとめ

所内試験電車に搭載した100kW級燃料電池のリスクアセスメントを行った結果、適切な検出装置の設置により許容できないリスク13件中9件は許容レベルになったが、現状では4件のリスクが残っている。残ったリスクは毎日の点検により安全を確保しているが、今後製作する燃料電池ではこれらを改善するように仕様に反映する予定である。

4. おわりに

本研究では、100kW級燃料電池を電源とする燃料電池・バッテリーハイブリッド試験電車の長期にわたる所内走行試験を行い、燃料電池の出力電圧に若干の低下が見られるものの、運転継続不能となるような性能低下・故障が発生しないことを確認した。

また、100kW級燃料電池のリスクアセスメントを行い、現状で残っているリスクを抽出した。今後燃料電池を製作する際にはこれらのリスクを改善し、安全性・信頼性の高い装置を製作したいと考えている。

なお、本研究開発の一部は国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

文献

- 1) 山本, 長谷川, 古谷, 小川:燃料電池・バッテリーハイブリッド試験電車の概要, RRR, Vol.66, No.3, pp.2-5, 2009
- 2) 西川尚男:燃料電池の技術, 東京電機大学出版局, 2010
- 3) Yoneyama, T. Ogawa, K. Hasegawa, H. Yamamoto, T, "The durability analysis of the fuel cell by the test railway vehicle," presented at the 11th World Congress on Railway Research, Milan, Italy, May 20- June 1, Paper 439.
- 4) 米山, 小川, 山本:構内試験電車による燃料電池のエネルギー変換効率の評価, 平成27年年電気学会全国大会, 2015
- 5) 米山, 小川, 長谷川, 山本:鉄道車両駆動用固体高分子形燃料電池システムのリスクアセスメント, 平成28年電気学会全国大会, 2016
- 6) 経済産業省:リスクアセスメント・ハンドブック(実務編), 2011

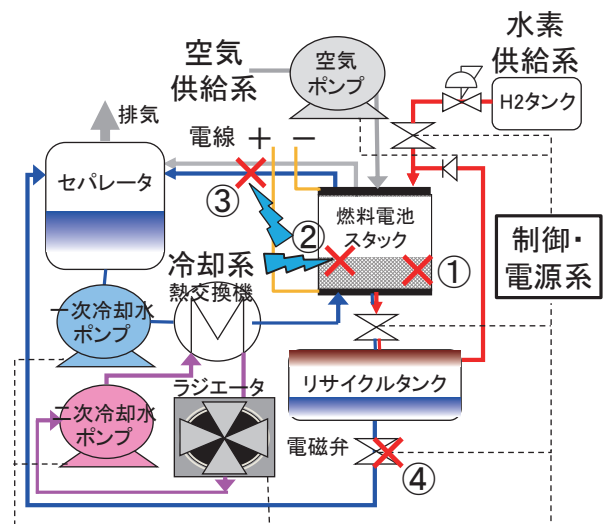


図11 燃料電池に残るリスク

表8 現状の燃料電池のリスクと改善案

番号	系統	危害シナリオ	現状			改善案	改善案実施後		
			頻度	被害	判定		頻度	被害	判定
①	冷却	冬期にヒータが故障し冷却水がスタック内で凍結しMEA破損, 水素・空気がスタック内で混合し, 発火・爆発	2	V	×	ヒータ二重化	1	I	○
②	冷却	冬期にヒータが故障し冷却水がスタック内で凍結し配管破損, 漏水し漏電	2	V	×	ヒータ二重化・漏電遮断器設置	1	I	○
③	冷却	シール材が劣化し配管接続部から充電部に漏水し漏電	4	V	×	接続部を溶接	1	I	○
④	水素	水素排気電磁弁が閉じず空気が逆流し静電気等で発火し爆発	2	V	×	電磁弁を二重化 / 逆止弁設置	1	I	○