

令和4年度

沖縄型クリーンエネルギー導入促進調査事業

「離島における燃料電池活用による

地産グリーン電力導入に関する調査事業」

調査報告書

令和5年 3月

株式会社 佐平建設

# 目 次

1. はじめに .....	- 1 -
1.1. 調査事業の背景 .....	- 1 -
1.2. 調査事業の目的と概要 .....	- 2 -
1.3. 調査事業の内容 .....	- 4 -
2. 燃料電池とは .....	- 5 -
2.1. 燃料電池の原理 .....	- 5 -
2.2. 燃料電池の特徴と種類 .....	- 5 -
3. 粗留エタノール製造に関する調査 .....	- 7 -
3.1. 宮古島バイオエタノール生産設備の概要 .....	- 7 -
3.2. 粗留エタノールの試験製造 .....	- 8 -
3.3. 粗留エタノールの品質分析 .....	- 9 -
3.4. バイオエタノールの製造コスト .....	- 10 -
3.5. 粗留エタノールの高効率生産法の検討 .....	- 11 -
4. エタノール改質型燃料電池（SOFC）の技術調査 .....	- 13 -
4.1. 粗留エタノールの水素改質性能 .....	- 13 -
4.2. 粗留エタノールの燃料電池燃料としての要求品質と品質課題 .....	- 26 -
4.3. 粗留エタノールを使用する燃料電池の予測性能 .....	- 31 -
5. エタノール改質型燃料電池の普及に向けた調査 .....	- 39 -
5.1. 燃料電池システムコストの動向及び発電コストの見通し等の普及環境 .....	- 39 -
5.2. 燃料電池の実証及び導入先の調査と導入スケジュール .....	- 43 -
6. バイオエタノール原料用バイオマス資源の調査及び再エネ電力の推計 .....	- 49 -
6.1. バイオマス資源の概要と利活用の方向性 .....	- 49 -
6.2. 離島におけるバイオマス資源量の概要 .....	- 50 -
6.3. バイオマス資源のエネルギー変換量の推計 .....	- 53 -
6.4. 久米島町の 20250 年脱炭素化に向けた取組 .....	- 56 -
6.5. スイートソルガム活用に向けた今後の課題 .....	- 57 -
7. まとめ .....	- 58 -
【参考文献・資料】 .....	- 60 -

## 1. はじめに

### 1.1. 調査事業の背景

2050 年度の脱炭素社会の実現に向けて、沖縄県では、新たな県のエネルギー基本計画となる『沖縄県クリーンエネルギー・イニシアティブ』「エラー! 参照元が見つかりません。」を策定し、その中で、2030 年度の将来像の実現に向けて今後 10 年間で取り組むべき方向性を示す基本目標として、①エネルギーの低炭素化、②エネルギーの自立分散化、③エネルギーの地産地消化を掲げている。このうち、「エネルギーの低炭素化」について、当面は再エネや天然ガス等の利用拡大を主とするものの、2050 年度の脱炭素社会を目指し、再エネの主力電源化や火力発電でのカーボンリサイクルの推進と合わせて、水素エネルギー、アンモニア等の『次世代エネルギー』の普及に向けた取組を進めることが示されている。また、「エネルギーの自立分散化」については、集中的なエネルギー供給システムの弱点を補い、安定供給とレジリエンスの観点も含めて、自立分散型エネルギーと集中型システムの協調を図るとしている。さらに、「エネルギーの地産地消化」については、エネルギーの供給・分配・活用とそれに伴うインフラ投資や新産業創出への波及を通して、地域社会や地域経済へ貢献するため、消費地での実情に合わせたエネルギー源の地産化の促進を図ることが示されている。

一方、宮古島市では、2019 年 3 月に『宮古島市環境モデル都市行動計画（第 3 次）』「エラー! 参照元が見つかりません。」を策定し、CO<sub>2</sub>排出量の削減目標を 2003 年の 321,000 t-CO<sub>2</sub>を基準とし、中期目標（2030 年）として約 37%削減の 201,000 t-CO<sub>2</sub>、長期目標（2050 年）として約 66%削減の 99,000 t-CO<sub>2</sub>とすることが示されている。そして、目標達成のためには、各需要家による省エネルギー対策の積み重ねと大幅な再生可能エネルギーの導入拡大が必須であるとしている。さらに、環境都市モデル計画の目標達成のためには、①市民一体となった省エネ対策の推進、②地産エネルギーの活用拡大、③市民主体のエコアイランド宮古島づくりと地域活性化を柱とし、特に、地産エネルギーについては、太陽光発電、風力発電、バイオマス、海洋エネルギー等、多様なエネルギー資源の活用を検討するとしている。

沖縄県の場合には、他の地域と比較して電源構成における化石燃料由来の割合が大きく「エラー! 参照元が見つかりません。」、CO<sub>2</sub>排出量削減のためには、より一層のエネルギーの低炭素化、グリーン電力の導入が望まれる。また、資源のほとんどを島外に依存する宮古島などの離島においては、エネルギーコストに対して外的な要因による影響を受けやすく、燃料価格の高騰や輸送コストの上昇が将来的に大きなリスクになる可能性もある。そのため、エネルギーの低炭素化に加えて、エネルギーの地産地消化によるエネルギー・セキュリティの確保が喫緊の課題であると言える。

## 1.2. 調査事業の目的と概要

宮古島でのエネルギーの脱炭素化・地産地消化、および地域活性化への取り組みの一つとして、既存のバイオエタノール生産設備で糖蜜を原料に生産されるバイオエタノールの利活用が考えられる。バイオ由来系燃料の中でも、バイオエタノールは常温では液体で貯蔵性や輸送性に優れており、島嶼地域の分散化電源の燃料として適していると言える。これまで、バイオエタノールはその多くが自動車用ガソリンへの混合用として用いられてきたが、燃料用エタノールに対してはアルコール分が体積濃度で 99.5%以上と規定されている<sup>[5]</sup>。一般的な蒸留法だけでは 96%以上の高濃度エタノールを得ることは困難で、共沸蒸留法など特別な方法が用いられるが、蒸留法によって高濃度エタノールを製造する方法では多量の熱エネルギーを消費する点が課題であった<sup>[6]</sup>。一般に、無水エタノールを製造する過程で消費される熱エネルギーの大部分は濃縮・脱水工程で消費されるため、最終製品がアルコール濃度 30~40%の粗留エタノールであれば、無水エタノールと比較して製造過程で消費されるエネルギーを大幅に削減できる<sup>[7][8]</sup>。そのため、粗留エタノールをそのまま燃料として使用できれば、その省エネルギー効果は大きい。

また、粗留エタノールは危険物に該当しない安全な燃料であることから、製造、保管場所、保管数量、輸送の制約が無いという利点もあり、その上、図 1-1 に示す通り、エタノール製造の濃縮・脱水工程を省略できるため、初期導入費用の大幅な低減も期待できる。さらに、エネルギーの地産地消化の面でも、地産の糖蜜を原料に既存設備で生産されるバイオエタノールを新たに発電用燃料として活用する意義は大きい。

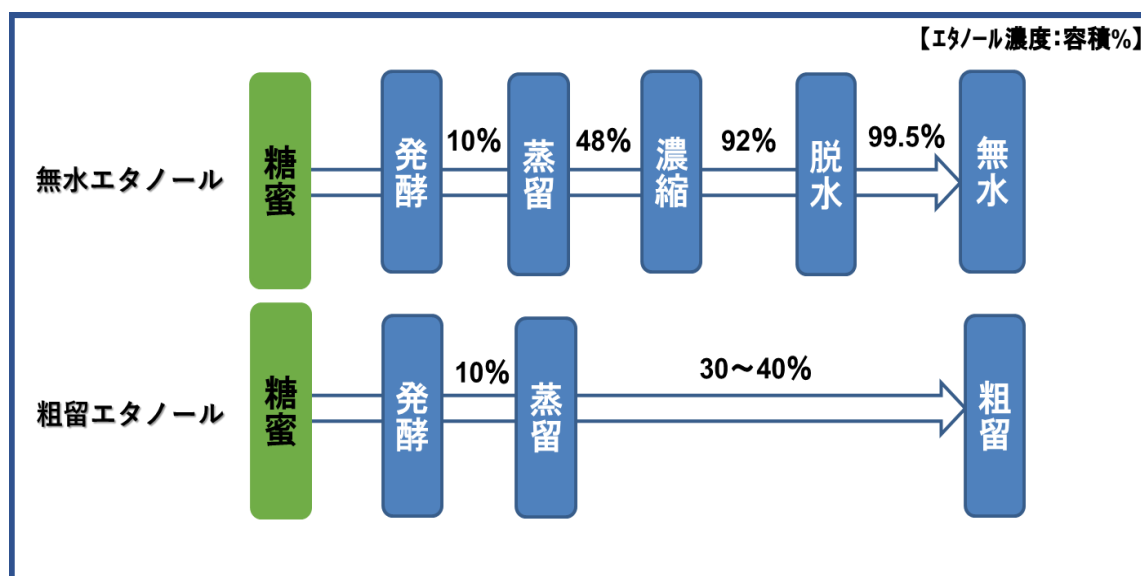


図 1-1 粗留エタノールの優位性

バイオエタノールを燃料とする発電機としては、火花点火エンジン、ガスタービン、燃料電池等が考えられるが、例えば、バイオエタノールをガソリンに混合して用いる場合には相溶性を保つために無水エタノールが原則である。また、ガスタービンで使用する場合には、無水エタノールであっても灯油などに比べて発熱量が低いこと、蒸気圧が低いこと、潤滑性に乏しいことなどが課題である。

一方、燃料電池は、低出力域でも高効率であることに加えて、低騒音・低振動などの特徴を有し、特に小型分散化電源として注目される。さらに、固体酸化物形燃料電池（以下、SOFC と呼ぶ）の場合には、低エタノール濃度の粗留エタノールをそのまま原燃料として利用できること、改質のために加える給水量を少なくできる（条件によっては、改質水の供給を無くすることができる）こと、比較的高温の排熱を利用して水蒸気改質を行うことによって燃料のアップグレードができることなど、発電システム全体として効率化を図ることができる。

そこで、本調査事業では、地産でカーボンニュートラルな燃料として期待される糖蜜を原料として生産される粗留エタノールの製造コストを把握すると共に、日立造船株式会社殿で既に商品化済の都市ガス用 SOFC に粗留エタノールを適用する場合の技術課題の抽出とその解決方法についての検討、燃料価格や設備価格等を考慮した SOFC の低炭素化・地産地消型分散型電源としての実現可能性について調査する。

さらに、離島におけるバイオエタノール製造原料としての糖蜜及び新たなバイオエタノール製造用資源作物として注目されているスイートソルガムの資源量についての調査を行い、その全量をバイオエタノールに変換し、SOFC 燃料に適用する場合の再生可能エネルギー由来の電力量（以下、再エネ電力量と呼ぶ）を推計し、離島における再生可能エネルギー電源比率（以下、再エネ電源比率と呼ぶ）について検証する。

### 1.3. 調査事業の内容

本調査事業の具体的調査内容を表 1-1 に示す。

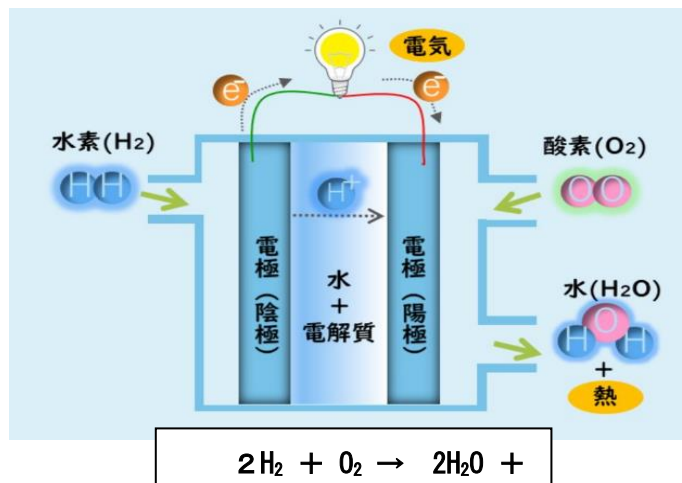
表 1-1 調査事業の具体的調査内容

	項 目	具体的調査内容など
1	粗留エタノール製造に関する調査	(1)粗留エタノールの試験製造及び粗留エタノールの品質調査 (2)粗留エタノールの製造コストの調査 (3)粗留エタノールの高効率製造法の探索
2	エタノール改質型燃料電池の技術調査	(1)粗留エタノールの水素改質性能の調査 (2)粗留エタノールへの要求品質調査及び課題の抽出 (3)粗留エタノールでの燃料電池予測性能等の調査
3	エタノール改質型燃料電池の普及に向けた調査	(1)燃料電池システムコストの動向及び発電コストの見通し等の普及環境調査 (2)宮古島における燃料電池の実証及び導入先の調査と導入スケジュール
4	バイオエタノール原料賦存量の調査	(1)宮古島におけるバイエタ原料の賦存量調査とバイエタ製造可能量の推計 ●糖蜜原料の賦存量調査とバイエタ製造可能量の推計 ●糖蜜代替原料(ソルガム)の賦存量調査とバイエタ製造可能量の推計 (2)各離島のバイエタ原料(糖蜜、ソルガム)の賦存量調査 (ヒヤリング、統計資料調査など)

## 2. 燃料電池とは

### 2.1. 燃料電池の原理

燃料電池とは、図 2-1 に示す通り、「水素」と「酸素」を化学反応させて、直接「電気」を作り出し、発電時に発生するのは水だけという水素の利用段階ではCO<sub>2</sub>排出ゼロで環境に優しい高効率の「発電装置」であり、「電池」と称されるが、蓄電池のように充電した電気を溜めておくものではない。燃料電池の燃料となる「水素」は、都市ガスなどを改質して作るのが一般的で、「酸素」は大気中から取り入れる。発電と同時に熱も発生するので、その熱を活かすことでエネルギーの利用効率を高めることが出来る。



(参考：<https://tenbou.nies.go.jp/science/description/detail.php?id=4>)

図 2-1 燃料電池の原理

### 2.2. 燃料電池の特徴と種類

燃料電池の主な特徴として、以下の四点を挙げることができる。

#### ○高い発電効率

従来の内燃機関のように、燃料を燃焼させ熱に変換した後、動力や電気に変換するのではなく、化学反応を利用して直接電気に変換するため、より高い発電効率が可能となる。

#### ○環境負荷低減効果

従来の内燃機関の燃焼過程で生じる NOX、SOX、PM 等の大気汚染物質はほとんど排出しない。更に、燃料電池の基本原理は化学反応であるため、騒音や振動が少ない。

#### ○燃料の多様性

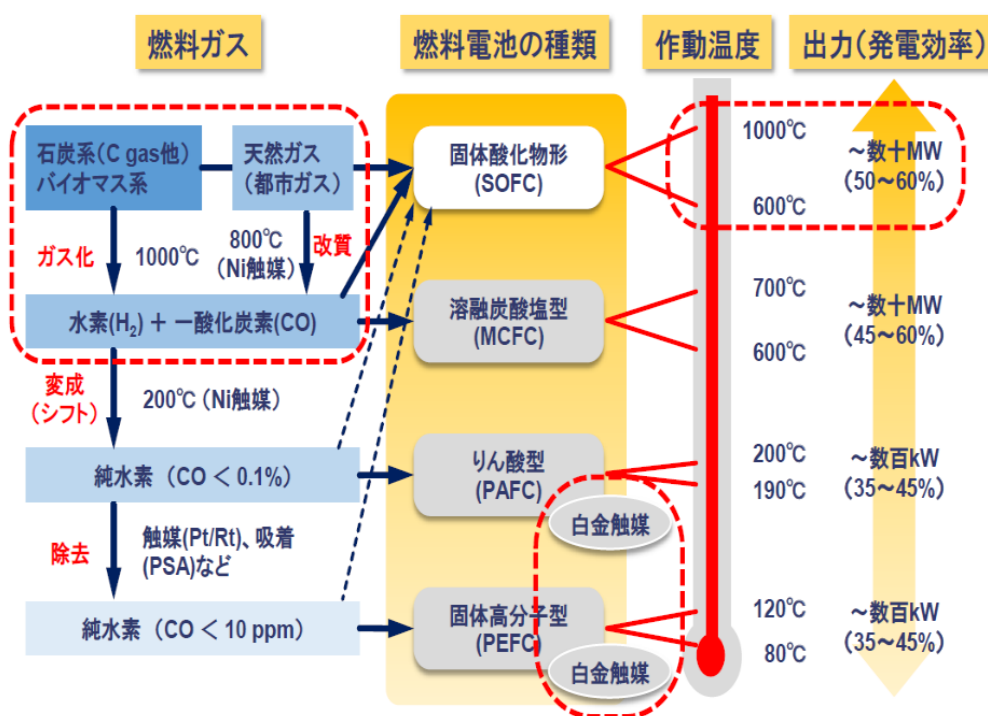
燃料電池の燃料である水素は、都市ガスをはじめ、LPG、アルコール等の多様な燃料を改質分解して得ることができ、さらに、風力発電や太陽光発電、バイオマス資源等の再生可能エネルギーからも得ることができる。

### ○分散型電源としての利用

燃料電池は、分散型電源として幅広く利用することができ、その場合には、コージェネレーションによる排熱利用、送電によるエネルギー損失の低減、災害時のバックアップ電源としての効果等が期待できる。

燃料電池は、使われる電解質の種類によって、図 2-2 に示す通り、「固体酸化物形 SOFC)」「熔融炭酸塩形 (MCFC)」「リン酸形 (PAFC)」「固体高分子形 (PEFC)」のおよそ 4 つに分類されるが、その中でも、本事業で調査対象としている SOFC は次の特徴を有している。

- 発電効率が 50%～60%で他の燃料電池に比べ発電効率が高く、火力発電の発電効率（40%前後）を上回る高い発電効率。
- 高温反応のため従来の高価な白金などの貴金属の触媒が不要で、コストダウンが可能。
- 日本が蓄積してきた、セラミックス技術を活用が活用可能。
- 都市ガスや化学燃料由来の水素以外にも、バイオガスなどの低炭素な燃料も活用可能。
- エネファームの燃料電池として先駆けて商用化された PECF と比較して、装置の構成がシンプルで、小型化・薄型化が可能。



(参考： [https://www.mitsui.com/mgssi/ja/report/detail/1221256\\_10674.html](https://www.mitsui.com/mgssi/ja/report/detail/1221256_10674.html))

図 2-2 燃料電池の種類



### 3. 粗留エタノール製造に関する調査

#### 3.1. 宮古島バイオエタノール生産設備の概要

宮古島バイオエタノール生産設備の概略フロー図を図 3-1 に示す。

本設備は、大きくは下記の「培養・発酵工程」、「蒸留工程」及び「濃縮・脱水工程」の三つの工程で構成されており、公称能力として、年間750KLの無水エタノールが生産可能となっている。

##### ○培養・発酵工程

原料調整槽で糖蜜を市水で糖度20％に調整した発酵原料を発酵槽で酵母菌により約24時間かけて発酵させてエタノール濃度9～10％のろみ液を製造。

##### ○蒸留工程

製造したろみ液を減圧及び常圧ろみ塔で蒸留して、エタノール濃度約48％の粗留エタノールを製造。

##### ○濃縮・脱水工程

製造した粗留エタノールを濃縮塔で濃縮し、エタノール濃度92％の含水エタノールを製造、更にゼオライト膜で脱水し、最終製品としてエタノール濃度99.5％以上の無水エタノールを製造。

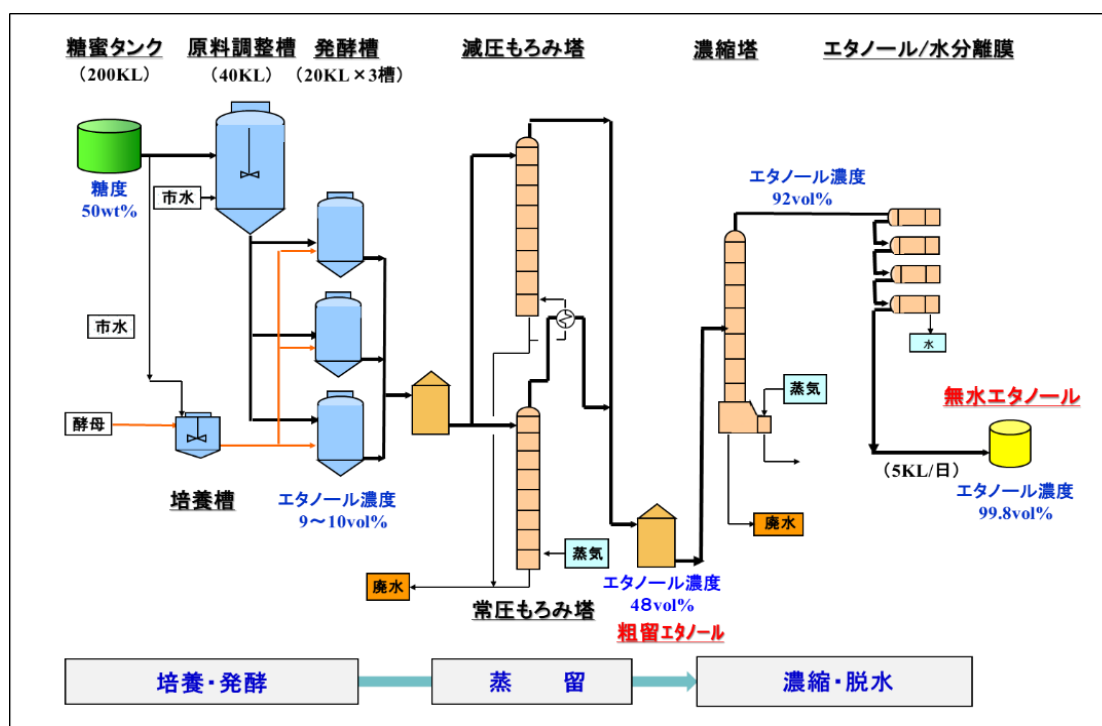


図 3-1 宮古島バイオエタノール生産設備の概略フロー図

### 3.2. 粗留エタノールの試験製造

粗留エタノールを SOFC 燃料として使用するに当たっては、製造コストの見極めと製造した粗留エタノールの品質が重要なポイントとなることから、本調査事業期間中に 3 回の粗留エタノールの試験製造を行い、用役消費データの収集と品質分析のための粗留エタノールのサンプル採取を行った。表 3-1 に粗留エタノール試験製造の運転結果の概要を示す。

尚、発酵工程は、現在使用している酵母菌では最大 7 バッチの運転が可能であるが、本調査事業では各回ともに必要最小限の 2 バッチの運転とし、試験製造した粗留エタノールは後工程の濃縮塔で濃縮運転を行い、最終製品としてエタノール濃度 9.2% の製品アルコールを製造した。

運転の状況としては、第 1 回運転では、後工程の濃縮塔の運転不具合による濃縮操作の一時中断、また第 3 回運転では回転機の不具合発生により、生産したもろみ液を全量処理できなくなるトラブルが発生したが、濃縮塔の運転不具合は運転解析後の後日の運転で解消が確認され、もろみ液の処理残は液肥としてサトウキビ畑に散布することで対応した。

表 3-1 粗留エタノール試験製造結果の概要

			第 1 回運転		第 2 回運転		第 3 回運転	
運転期間			7/4～7/15,7/26		10/3～10/14		1/10～1/20	
発酵バッチ数			1	2	1	2	1	2
発酵温度		℃	32	32	32	32	32	32
発酵時間		hrs	41	21	41	21	41	21
発酵仕込量	糖蜜	L	3,421	3,347	3,418	3,343	3,399	3,339
	調整水	L	11,755	9,031	11,714	8,943	11,777	8,771
	合計	L	15,176	12,378	15,132	12,286	15,176	12,110
仕込糖度		w/v%	16.3	19.6	16.3	19.6	17.0	19.9
もろみ液	エタノール濃度	vol%	7.7	9.1	7.6	9.5	7.8	9.6
	処理量	L	19,942		16,999		6,252	
粗留エタノール	エタノール濃度	vol%	47.4		48.0		47.8	
	生産量	L	3,762		3,320		1,162	
	サンプリング	-	○		×		○	

### 3.3. 粗留エタノールの品質分析

燃料電池メーカーの日立造船株式会社殿との協議の上、粗留エタノールを燃料電池の燃料として使用するに当たっての確認すべき品質項目を決定し、第1回運転と第3回運転のサンプルを（一社）日本海事検定協会理化学分析センターに送り、品質分析を行った。

その分析結果を表3-2に示すが、品質分析結果に基づく粗留エタノールの燃料電池燃料としての適合性などの評価については、第4章にて触れることとする。

表 3-2 粗留エタノールの分析結果

分析項目	表示法	分析結果		試験法
		14-Sep-22	7-Mar-23	
1 アルコール分	容量%	47.4	45.5	JAA S001
2 蒸発残分	mg/100mL	4.7	4.2	JAA S001
3 有機不純物				
メタノール	mg/L	30	50未満	JAA S001
2-プロパノール	mg/L	10未満	10未満	
アセトアルデヒド	mg/L	114	312	
1-プロパノール	mg/L	351	314	
1-ブタノール	mg/L	13	12	
2-ブタノール	mg/L	10未満	10未満	
2-メチル-1-プロパノール	mg/L	179	190	
2-メチル-1-ブタノール	mg/L	113	150	
アセトン	mg/L	18	10未満	
酢酸エチル	mg/L	89	61	
シクロヘキサノール	mg/L	91	10未満	
n-ペンタン	mg/L	10未満	10未満	
4 硫酸塩	検出の有無	-	有り	JAA S001
		(SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ≧ 2mg/L)		
5 酸度（酢酸として）	質量分率%	-	0.0208	JIS K 2190
6 電気伝導度(25℃)	μ S/m	2280	2370	JIS K 2190
7 pH	-	-	4.4	JIS K 2190
8 硫黄分	mg/kg	2.6	2.1	JIS K 2190
9 強熱残分	mg/100mL	-	0.0017	JIS K 0067
10 微量元素				
ナトリウム(Na)	mg/L	1.2	2.5	ICP-OES
マグネシウム(Mg)	mg/L	0.46	0.41	
アルミニウム(Al)	mg/L	0.01未満	0.01未満	
カルシウム(Ca)	mg/L	0.95	1.9	
マンガン(Mn)	mg/L	0.01未満	0.01未満	
鉄(Fe)	mg/L	0.12	0.12	
銅(Cu)	mg/L	0.01未満	0.01未満	
カリウム(K)	mg/L	4.6	1.0	
ケイ素(Si)	mg/L	0.23	0.14	
11 イオン成分				
リン酸イオン(PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	mg/L	1未満	1未満	イオンクロマトグラフ
臭化物イオン(Br <sup>-</sup> )	mg/L	1未満	1未満	
フッ素イオン(F <sup>-</sup> )	mg/L	22	-	
塩素イオン(Cl <sup>-</sup> )	mg/L	3	3	
硫酸イオン(SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	-	3	
フッ素イオン(F <sup>-</sup> )	mg/kg	-	1未満	La-ALC 法

### 3.4. バイオエタノールの製造コスト

本調査事業における粗留エタノール試験製造及び本設備の過去の運転データなどを参考にバイオエタノール生産設備での原料及び用役（電力、A 重油、市水）の消費量について解析及び評価を行った。

解析結果を無水エタノール 1 L 当たりの原料及び用役の消費量（原単位）としてまとめた結果を表 3-3 に示すが、粗留エタノールの用役原単位は、無水エタノールに比べ電力で 18%、燃料で 62%、用水で 14% 低くなっており、予測通り無水化するための濃縮・脱水工程を省略することでの熱エネルギー削減効果の大きさが確認された。

表 3-3 原料及び用役原単位(無水エタノール 1L 当たり)

	原料原単位 (糖蜜)	用役原単位		
		電力原単位	燃料原単位	用水原単位
	(kg/L)	(KWh/L)	(L/L)	(m3/L)
粗留エタノール (低減率：対無水)	4.36	0.666 (18%)	0.111 (62%)	0.012 (14%)
無水エタノール	4.36	0.810	0.291	0.014

尚、原単位試算に当たっては、用役原単位が発酵工程の運転工程により変動するため、図 3-2 に示す通り、1 サイクルの運転として、糖蜜を原料に 7 バッチの発酵を行う繰返し回分発酵を基本工程とした。

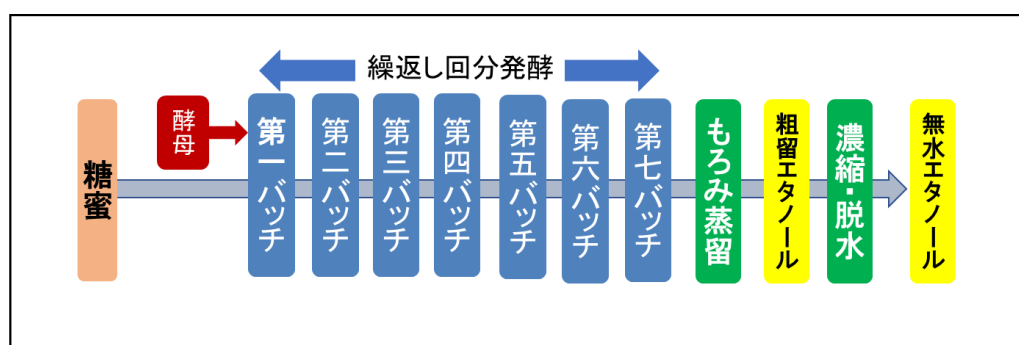


図 3-2 繰返し回分発酵の基本工程

表 3-3 の原単位に直近の糖蜜単価及び用役単価を適用して試算した製造コスト（変動費）は表 3-4 の通り、粗留エタノールで 47 円/L、無水エタノールで 75 円/L と試算され、粗留エタノールは無水エタノールに比較して、37%ほど製造原価が安くなることが検証でき、製造コスト面での粗留エタノールの優位性を確認することができた。

尚、製造コスト試算に当たっては、現時点での糖蜜単価 3 円/kg、電力単価 22 円/KWh、燃料単価 135 円/L、用水単価 371 円/m<sup>3</sup> を使用した。

表 3-4 粗留及び無水エタノールの製造コスト(無水エタノール 1L 当たり)

	原料糖蜜費 (円/L)	電力費 (円/L)	燃料費 (円/L)	用水費 (円/L)	製造コスト (円/L)
粗留エタノール	13	15	15	4	47
無水エタノール	13	18	39	5	75

### 3.5. 粗留エタノールの高効率生産法の検討

宮古島バイオエタノール生産設備では、エタノール濃度 9～10vol%の発酵もろみ液からエタノール濃度 48vol%前後の粗留エタノールを製造する蒸留システムは、発酵もろみ液を 2 分割して常圧もろみ塔と減圧もろみ塔に供給し、常圧もろみ塔の塔頂蒸気で減圧もろみ塔の塔底を間接的に加熱して減圧もろみ塔で必要な熱エネルギーを供給する二重効用法で省エネルギー化を図っている。

粗留エタノールを SOFC の燃料として利用していくためには、製造コストの削減が必要となり、粗留エタノール製造時の更なるエネルギー削減が求められることになる。

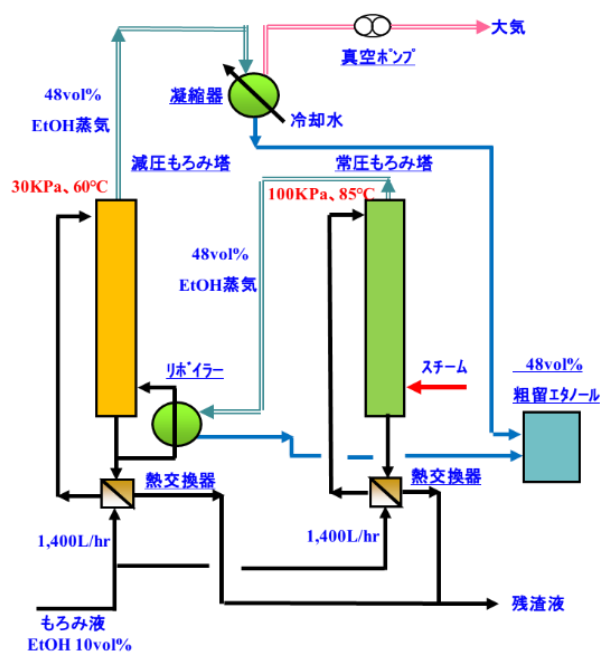
以上により、現状の蒸留システムを上回るより省エネ性の高い蒸留システムを求めて、調査を進めたところ、省エネ性の高い新たな蒸留システムとして、自己蒸気再圧縮法による蒸留プロセスが注目されていることが判明した。

これは蒸留塔の塔頂より留出する軽成分の蒸気を圧縮機により昇圧昇温し、保有している潜熱をリボイラーにより塔底液に伝え、上昇蒸気を発生させるものであり、2 重効用法にくらべてさらに経済的であると言われている。

本蒸留システムは、今後の省エネ型蒸留塔の主流をなすものと考えられており、今後、費用対効果、運用方法なども含めて、更なる検討を進めていくこととする。

図 3-3 に 2 重効用式蒸留システムと自己蒸気再圧縮式蒸留システムの概要図を示す。

## 二重効用式蒸留システム



## 自己蒸気再圧縮式蒸留システム

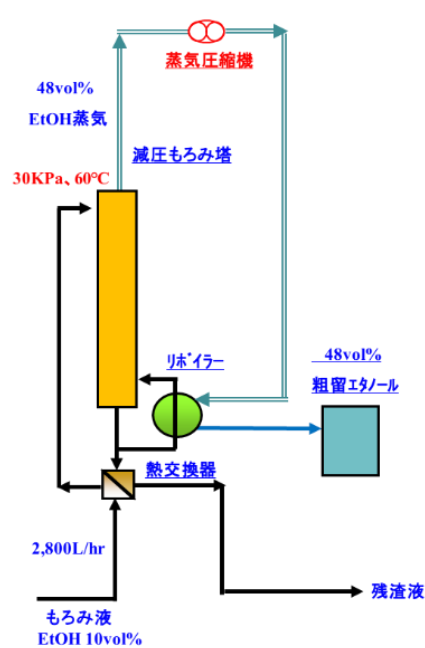


図 3-3 粗留エタノールの高効率蒸留システム

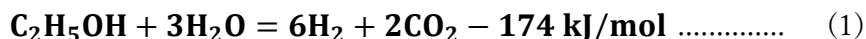
## 4. エタノール改質型燃料電池（SOFC）の技術調査

### 4.1. 粗留エタノールの水素改質性能

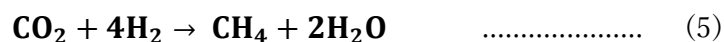
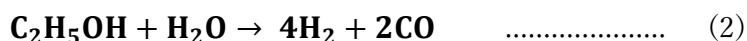
ここでは、粗留エタノールを原燃料として SOFC に用いる場合に、技術面での実現可能性を評価する上で重要となる水蒸気改質性能について検討する。

#### 4.1.1. 粗留エタノールの水素改質

理想的なエタノールの水蒸気改質反応は、以下の(1)式で表される。



総括反応式は(1)式に示すとおりであるが、実際には、以下の(2)式から(7)式で示す複数の反応が同時に進行する<sup>[9]・[11]</sup>。これらのうち、特に支配的なものは(2)式の改質反応（吸熱反応）と(3)式のシフト反応（発熱反応）であるが、反応全体としては大きな吸熱を伴うため、外部から熱エネルギーを供給する必要がある。



炭化水素系の原燃料を SOFC に用いる場合に、原燃料から水蒸気改質によって水素を取り出す方法には、SOFC のセル上での発電による発熱を改質反応の熱源とする内部改質方式と燃料電池セルスタックとは別に水蒸気改質器を設ける外部改質方式の 2 つの方法がある。

日立造船(株)製 SOFC システムでは外部改質方式を採用しており、原燃料の大部分は水蒸気改質器で改質されるが、未反応のエタノール等は下流の燃料電池セルスタックに流入し、電極上で残りの燃料の一部が改質される。上述のとおり、水蒸気改質反応は大きな吸熱を伴うため、燃料電池セルで改質反応が生じた場合にはセルに大きな温度分布が生じ、熱応力によってセルが破損する懸念がある。そのため、燃料電池セルスタックに導入される前に、原燃料が一定量以上改質されている必要がある。

(1)式に示すように、理想的には1モル（炭素原子が2個）のエタノールを改質するために必要な水蒸気は3モル（ $S/C=1.5$ 、ここで、 $S/C$ はスチーム／カーボン比）であるが、実際には、改質反応時の炭素析出（(6)式または(7)式で示す反応）を避けるために、 $S/C$ を2.0以上にすることが望ましいとされる。なお、日立造船㈱の水蒸気改質器に採用しているRu系触媒は、Cu/ZnO系触媒と比較して改質効率が高く炭素析出も少ないとされており、宗野らの実験<sup>[9]</sup>でも、Cu/ZnO系触媒では $S/C \approx 2.0$ 程度で炭素の析出が見られたのに対して、Ru系触媒では $S/C \approx 2.0$ 程度でも触媒上での炭化は確認されなかったとしている。

さらに、実際のエタノールの水蒸気改質反応では、水素だけでなくメタンも生成され（(4)式および(5)式）、特定の触媒に対しては、特に反応ガス中のエタノール分圧が高い程メタンが多く生成されると言われており<sup>[10]</sup>、水蒸気改質によって生成された一酸化炭素や二酸化炭素と水素が反応してメタンが生成される。

以上のように、改質触媒やセルスタックを長期にわたって健全に維持し、かつ、エタノールから効率的に水素を取り出すためには、エタノールの水蒸気改質反応における改質温度、 $S/C$ 等の各種運転条件の影響を十分に把握しておく必要がある。これらを踏まえた上で、改質反応に必要な熱エネルギーをSOFCの排熱を利用して供給する、可能な限り低温で改質する、可能な限り $S/C$ を低くするなど、システム全体としての効率的な熱マネジメントが求められる。



#### 4.1.2. 水素改質システム

日立造船㈱で既に開発済みの都市ガスを原燃料とする業務・産業用 SOFC 発電装置に搭載される水素改質システムを図 4-1 に示す。このシステムは、都市ガス昇圧ポンプ(BL-01)、改質水ポンプ(PU-01)などのユーティリティ供給装置、水蒸気改質器(RX-01)、蒸発器(VP-01)、アノード予熱器(HA-01)などからなる。昇圧ポンプで所定の圧力に加圧された都市ガスは、脱硫器(DS-01)を通過する際にガス中に含まれる付臭剤などの硫黄化合物が脱硫器内部の吸着剤で吸着・除去される。一方、給水ポンプで加圧された改質水はイオン交換樹脂(IE-01)に送られ、液中に含まれる電解質が吸着・除去された後に蒸発器（または気化器とも言う）に供給される。蒸発器で発生した過熱蒸気と脱硫後の都市ガスからなる混合気は、予熱器で一定の温度まで加熱されて改質器に送られる。ここで外部から加熱されることで、内部の触媒表面上で水蒸気改質反応が生じ、水素を多量に含む改質ガスとなって改質器から排出される。

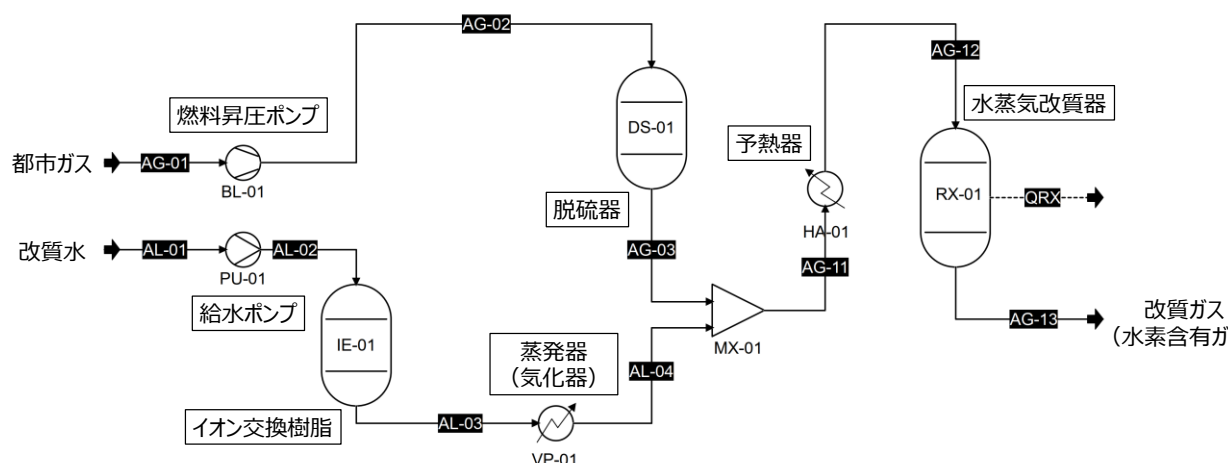


図 4-1 水素改質システムのフロー図（都市ガス燃料の場合）

原燃料が都市ガスと同様の気体燃料であっても、食品廃棄物由来のバイオ発酵ガスや下水汚泥由来の消化ガスなどの場合には、燃料中に多種の不純物が含まれ、かつ、その濃度が非常に高い。そのために、SOFC システム内部の脱硫器だけでは十分に不純物を除去できない場合が多い。その場合には、通常の脱硫器の上流側に、前処理装置として脱硫塔や吸着塔を追加するなどの対策がとられる（図 4 -2）。

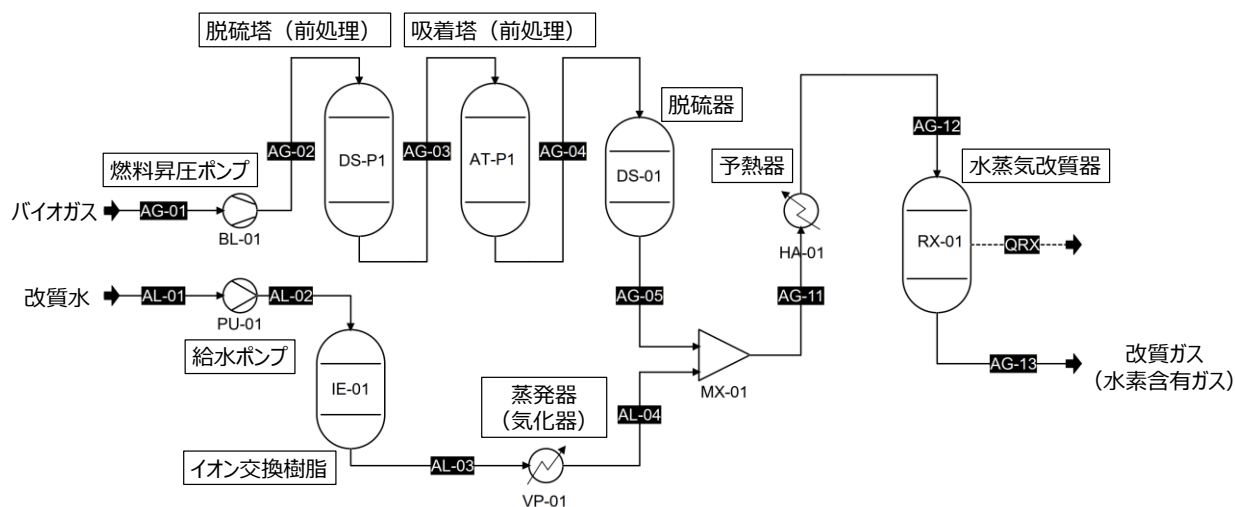


図 4-2. 水素改質システムのフロー図（バイオガス燃料 SOFC の場合）

一方、本調査で対象とするバイオエタノールを原燃料とする水素改質システムは、燃料供給系が簡略化される。図 4-3 にバイオエタノール水素改質システムのフローの一例を示す。

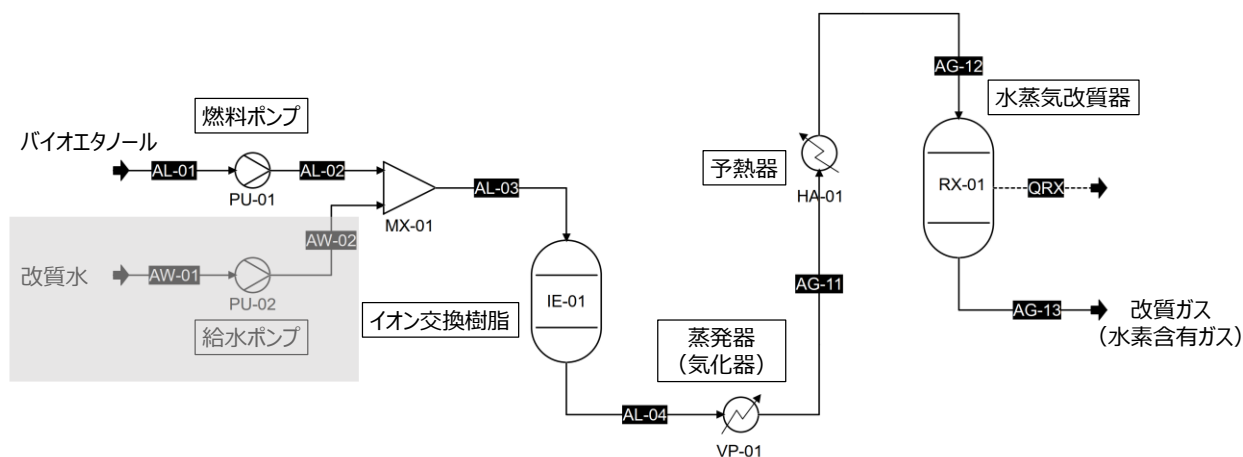


図 4-3. 水素改質システムのフロー図（バイオエタノール SOFC の場合）

図では原燃料（バイオエタノール）供給系統と改質水系統（図中の網掛け部分）をそれぞれ別に配置する例を示しているが、燃料の組成が大きく変化しなければ、必ずしも個別に用意する必要はない。特に、粗留エタノールを原燃料に用いる場合には、運転条件等によっては改質水を加える必要もなく、この場合にはシステムが大幅に簡略化される。

ただし、バイオエタノールの場合には、気体燃料の場合に用いられる乾式の脱硫や吸着による不純物除去方法を用いることが困難である。そのため、改質触媒やセルスタックの健全性を長期間維持するためには、燃料中の不純物を可能な限り燃料製造側（蒸留側）で除去しておくことが望ましい。燃料製造側で不純物を除去することが困難な場合には、SOFC システム内の改質水用イオン交換樹脂を用いて不純物を吸着・除去することになるが、イオン交換樹脂だけでは有機化合物および無機化合物を除去することは困難である。ここで除去できない不純物については、さらに下流の蒸発器で捕集・回収する必要がある、従来の都市ガス用 SOFC とは異なる対応が必要になる。また、これらで回収・除去できない不純物は改質器および燃料電池セルスタックに流入する可能性があるが、どのような物質がどの程度流入し、これらの不純物が改質触媒およびセルスタックにどのような影響を及ぼすのかをあらかじめ調べておく必要がある。

本章および次章で、原燃料を粗留エタノールとした場合の各種特性をプロセスシミュレーションによって調べる。

#### 4.1.3. 粗留エタノールの蒸発特性の確認

粗留エタノールの水蒸気改質特性を調査する前に、蒸発特性について調べた。粗留エタノール中には主成分のエタノールや残留水分の他に微量成分が多数含まれている。それら微量成分のうち、特にエタノールよりも沸点が高い有機物を総称して一般にフーゼル油と呼ぶが、それぞれの濃度と蒸気圧によっては、燃料電池装置内の蒸発器で蒸発させた際に完全に気化せずに、一部成分が装置内で濃縮されてしまうおそれがある。そこで、粗留エタノールの実液の成分分析結果を参考に組成を模擬し、プロセスシミュレータ（ASPEN Plus、AspenTech 社製）を用いて蒸発特性を確認した。

模擬粗留エタノールの組成を表 4-1 に示す。模擬組成は粗留エタノールの実液の成分分析結果を参照した。シミュレーション条件および結果を合わせて表 4-2 に示す。また、図 4-4 にはプロセスシミュレーションモデルのフローを示す。なお、蒸発器温度には日立造船(株)SOFC 発電装置内の蒸発器の設計蒸発温度である 200℃を採用し、圧力は大気圧とした。

表 4-1 模擬粗留エタノールの組成※1

化学種	示性式	単位	濃度※2	沸点※3 ℃
エタノール	$C_2H_5OH$	mol %	20.77	78.3
水	$H_2O$	mol %	79.19	100
メタノール	$CH_3OH$	mol ppm	23.8	64.7
アセトアルデヒド	$CH_3CHO$	mol ppm	65.5	20.2
1-プロパノール	$C_3H_7OH$	mol ppm	148.5	98
n-ブタノール	$C_4H_9OH$	mol ppm	4.5	117
イソブチルアルコール	$CH_3CH(CH_3)CH_2OH$	mol ppm	61.5	108
2-メチル-1-ブタノール	$C_2H_5CH(CH_3)CH_2OH$	mol ppm	32.5	128.7
アセトン	$CH_3OCH_3$	mol ppm	7.8	56.5
酢酸エチル	$CH_3COOC_2H_5$	mol ppm	25.7	77.1
シクロヘキサン	$C_6H_{12}$	mol ppm	27.5	80.7

※1 : 粗留エタノール実液の成分分析結果よりシミュレーションで使用する組成を模擬した。

※2 : 粗留エタノールは液体の体積濃度で 47.4 vol. %、重量濃度で 40.1 wt. %程度に相当する。

※3 : 各化学種の沸点は純物質の 1 気圧下での値を用いた。

表 4-2 蒸発特性シミュレーション条件およびシミュレーション結果

使用ソフトウェア	Aspen Plus V10
気液平衡推算モデル	ENRTL-RK
蒸発器モデル	Heater（定温定圧、容積無限大）
蒸発器温度	200 °C
蒸発器圧力	0 kPaG（大気圧）
蒸発器入口液体分率	100 %
蒸発器出口液体分率	0 %
同気体分率	100 %

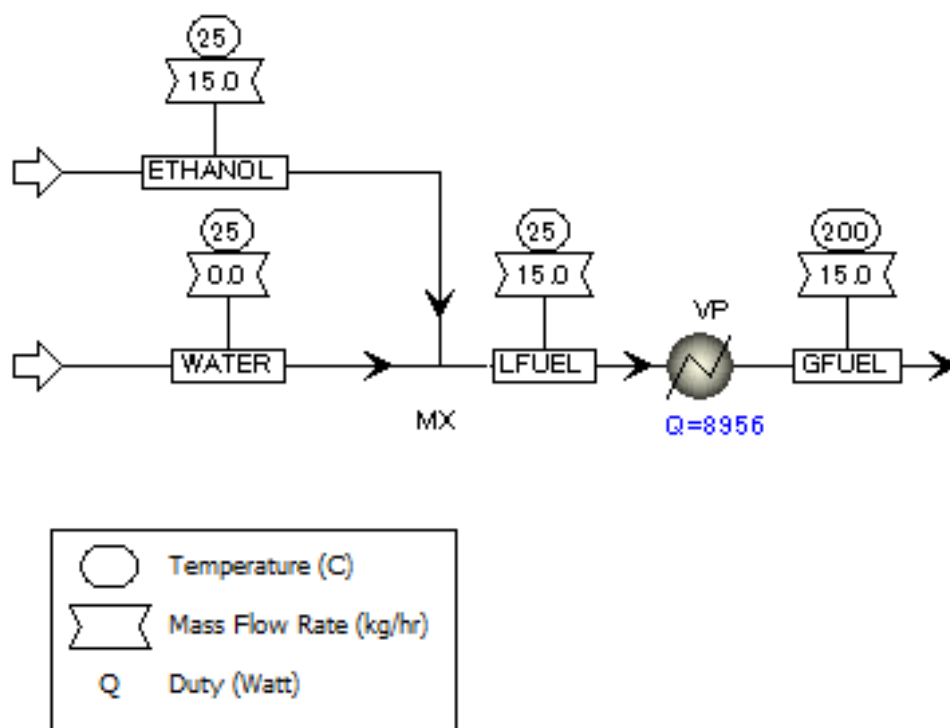


図 4-4 蒸発特性シミュレーションフロー

表 4-2 に示すように、蒸発器出口の液体分率が 0 %で同気体分率が 100 %となっており、模擬粗留エタノールは今回の条件で完全に蒸発することが確認できた。これは、今回設定した蒸発温度が、有機微量成分のそれぞれの純物質での沸点よりも十分高く、そのために液体の残留が生じていないものと考えられる。原理的には、出口から粗留エタノールが得られる 1 次蒸留塔の運転温度より高い温度で蒸発器を運転していれば、再度全量が蒸発するはずなので、液体が残留することはないとも言える。

以上から、本系と本条件の限りでは、蒸発器での液体残留と濃縮のおそれはなく、圧力が同じで 200 °C以上の蒸発器温度であれば、同様に完全に蒸発することが期待される。すなわち、現行の日立造船(株)SOFC 発電装置（特に蒸発器）の仕様で、粗留エタノールに含まれる有機性微量成分が残留・濃縮することはなく、問題なく蒸発・気化させることが可能であると言える。

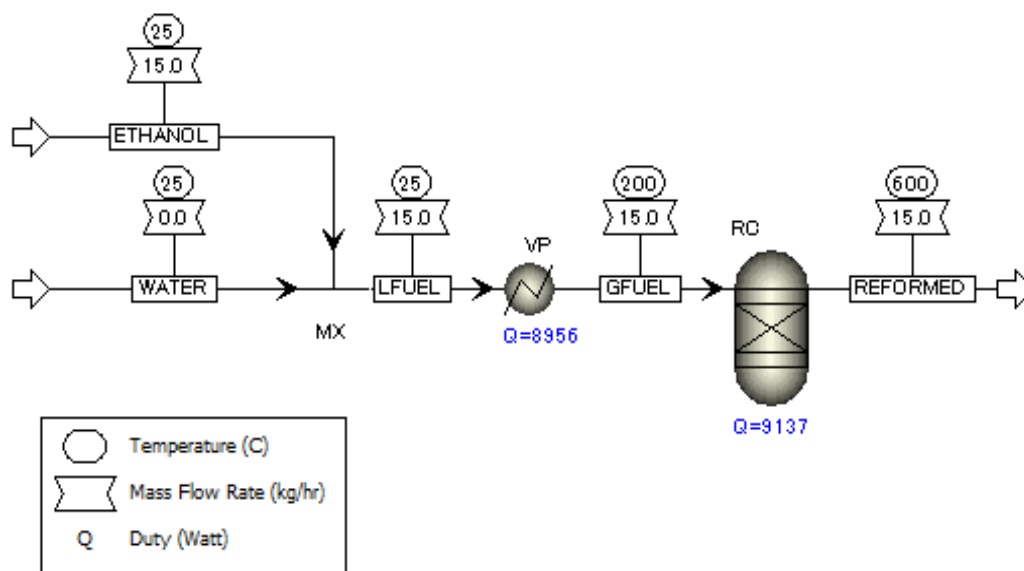
また、1 次蒸留塔の運転温度と SOFC 発電装置内蒸発器の出口温度をモニターすることで、液体の残留が生じるか否かを判断することができ、これによって蒸発器内の状態を常に把握することも可能である。

#### 4.1.4. 水素改質特性の推算

ここでは、粗留エタノールの水蒸気改質特性について推算する。特に改質器の性能劣化につながる炭素析出の有無・程度について、粗留エタノールの改質性能におよぼす O/C（混合物中の全酸素元素／同全炭素元素）改質温度の影響をプロセスシミュレーションによって試算した。O/C は S/C と同様に、炭化水素の水蒸気改質における炭素析出の生じやすさを示す指標である。エタノール分子中には酸素原子が含まれており、その影響を加味するため、ここでは O/C を指標として採用した。なお、酸素原子を含まない炭化水素の水蒸気改質の場合、O/C と S/C は一致する。

また、エタノールの改質特性のほか、粗留エタノールに含まれる有機微量分が改質器でどのように変性するかも同様にプロセスシミュレーションによって調べた。

図 4-5 には調査に用いたシミュレーションフローを、表 4-3 にはシミュレーション条件をそれぞれ示す。粗留エタノールは前節と同様に表 4-1 の組成とし、改質器入口の O/C は純水を加水することで調整した。調整範囲は O/C：1.5～4.0 である。水蒸気改質を行う改質器の反応器モデルとしては「RGibbs」を採用した。「RGibbs」モデルは、ギブスの自由エネルギーをもとに、入口の化学組成と与えた温度や圧力の条件から出口の平衡組成を推算するモデルである。改質器の計算条件は、日立造船㈱の SOFC 発電装置内改質器の設計条件である改質器温度：600℃を中心として 400℃～700℃（100℃刻み）の間で変化させた。改質圧力については 0 kPaG（一定）とした。



ETHANOL：粗留エタノール、WATER：濃度調整用純水、MX：合流部（混合器モデル）、VP：蒸発部（加熱器モデル）、RC：改質器（反応器モデル、ギブスの自由エネルギーをもとに平衡組成を推算する RGibbs Type）。

図 4-5 水蒸気改質特性シミュレーションフロー

表 4-3 水蒸気改質特性シミュレーション条件

使用ソフトウェア	Aspen Plus V10
気液平衡推算モデル	ENRTL-RK
蒸発器モデル	Heater（定温定圧、容積無限大）
蒸発器温度	200 °C
蒸発器圧力	0 kPaG（大気圧）
改質器モデル	RGibbs（定温定圧、容積無限大）
改質器温度	600 °C（400 ～ 700°C）
改質器圧力	0 kPaG（大気圧）
O/C 調整方法	粗留エタノールへの純水追加による（O/C 調整範囲：1.5 ～ 4.0）
想定化学種	○模擬粗留エタノール組成中の化学種
	○同化学種中、アルコール酸化で生じるアルデヒド、カルボン酸、ケトン
	○水蒸気改質で生じる化学種（H <sub>2</sub> 、CO、CO <sub>2</sub> 、C1～C4 のアルカン）

なお、Aspen Plus で化学反応を含む計算を行う場合は、指定の化学種以外は計算対象から外されるために、事前に存在が想定される化学種を全て計算対象として設定しておく必要がある。今回の調査においては、模擬粗留エタノール中の化学種のほか、それらを出発点の化学種としてアルコール酸化反応によって生じるアルデヒド類・カルボン酸類・ケトン類、および水蒸気改質で生じる H<sub>2</sub>・CO・CO<sub>2</sub>・C1～C4 のアルカンも対象に設定している。その一覧を表 4-4 に示す。

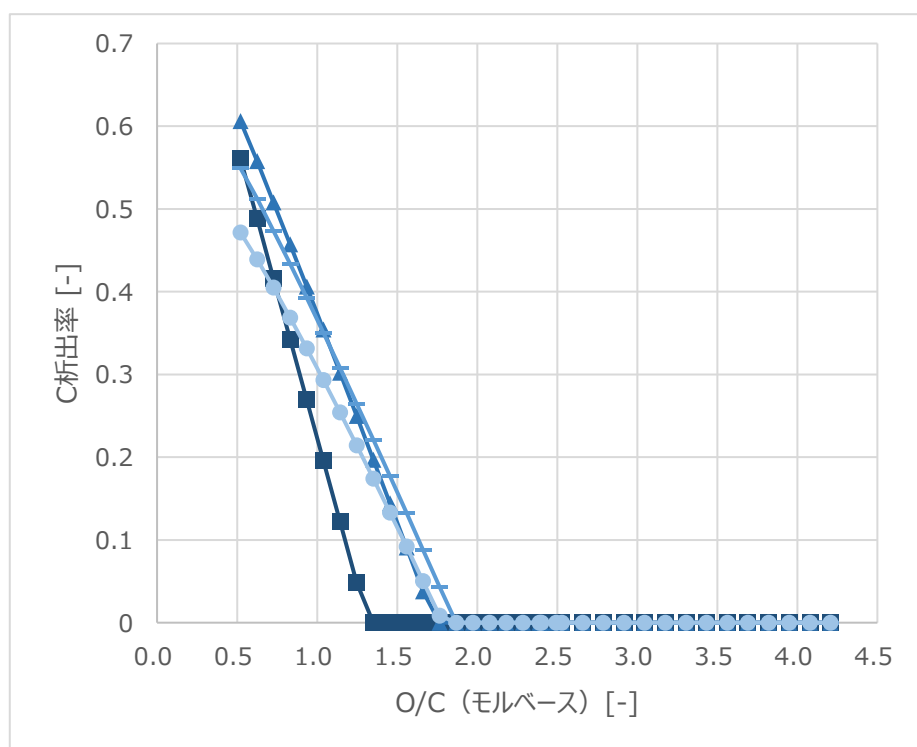
図 4-6 に粗留エタノールへの加水量を変化させて O/C を調整した場合の改質器出口での炭素析出率を示す。横軸は O/C、縦軸は炭素析出率を示しており、炭素析出率は（改質器出口固体炭素）／（同全炭素）：（モルベース）として定義した。改質器温度：600 °C、改質器圧力：0 kPaG の条件下では、O/C：3.0（エタノール濃度：33.9 wt. %相当）にて固体炭素の析出は確認されず、同じ温度と圧力で加水量を増やして O/C を 4.0 まで変化させても、同様に炭素析出は見られない。また、加水をしない模擬粗留エタノールのみの O/C：2.4（エタノール濃度：40.1 wt. %相当）でも炭素析出は生じていない。参考のため、模擬粗留エタノールから水のみを除いて O/C を下げる場合も試算したところ、O/C：1.75（エタノール濃度：50.4 wt. %相当）までは炭素析出がなかったが、1.66（同 52.4 wt. %相当）を下回ったところで固体炭素が現れ、析出率は 0.03 程度となった。更に水を除いて O/C を下げると炭素析出率は増加した。



表 4-4 計算対象化学種一覧

化学種	示性式	化学種	示性式
エタノール	$C_2H_5OH$	エタン	$C_2H_6$
水	$H_2O$	プロパン	$C_3H_8$
メタノール	$CH_3OH$	n-ブタン	$CH_3(CH_2)_2CH_3$
アセトアルデヒド	$CH_3CHO$	イソブタン	$CH_3CH(CH_3)CH_3$
1-プロパノール	$C_3H_7OH$	ホルムアルデヒド	$HCHO$
n-ブタノール	$C_4H_9OH$	ギ酸	$HCOOH$
イソブチルアルコール	$CH_3CH(CH_3)CH_2OH$	酢酸	$CH_3COOH$
2-メチル-1-ブタノール	$C_2H_5CH(CH_3)CH_2OH$	エチレン	$CH_2=CH_2$
アセトン	$CH_3OCH_3$	n-プロピオン アルデヒド	$C_2H_5CHO$
酢酸エチル	$CH_3COOC_2H_5$	プロピオン酸	$C_2H_5COOH$
シクロヘキサン	$C_6H_{12}$	イソプロピル アルコール	$CH_3CH(OH)CH_3$
炭素	$C$	n-ブチルアルデヒド	$CH_3(CH_2)_2CHO$
二酸化炭素	$CO_2$	酪酸	$CH_3(CH_2)_2COOH$
一酸化炭素	$CO$	イソブチル アルデヒド	$CH_3CH(CH_3)CHO$
水素	$H_2$	イソ酪酸	$CH_3CH(CH_3)COOH$
酸素	$O_2$	2-メチルブチル アルデヒド	$C_2H_5CH(CH_3)CHO$
メタン	$CH_4$	2-メチル酪酸	$C_2H_5CH(CH_3)COOH$

改質器温度：400 °C、および 500 °Cでは O/C：1.75 でも炭素析出が生じたが、700 °Cでは O/C：1.35（エタノール濃度：60.0 wt%相当）程度でも炭素の析出は確認されなかった。また、いずれの温度でも特定の O/C を境に、O/C を下げると炭素析出率が増加する傾向が見られた。起動停止の工程を考慮すると設計温度の 600 °Cより低温の改質器に粗留エタノールを供給することもあるので、多少の余裕を考慮して、エタノール濃度：46.4 wt%を超える場合は加水をして O/C を 2.0 以上とした方が改質器内での炭素析出を抑制でき、それに伴う不具合を低減できると考える。

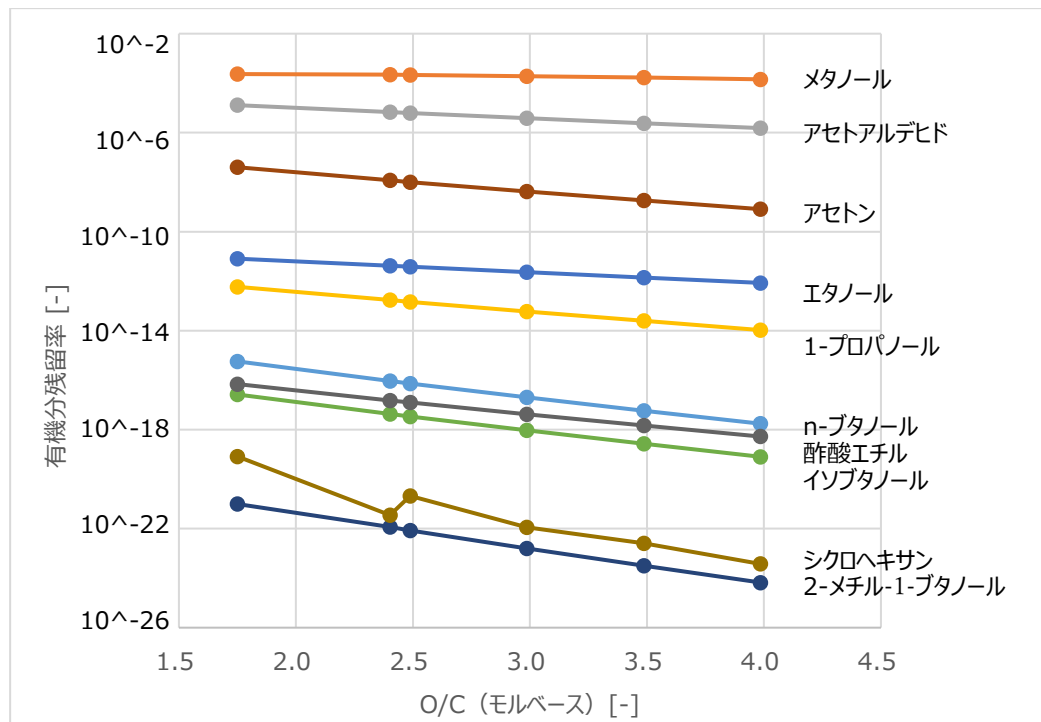


粗留エタノールへの加水量を変え、それを反応器モデル (Type:RGibbs) に導入、得られた出口組成から炭素析出率を算出し、反応器温度ごとにプロットした。改質器温度：400 (○)、500 (□)、600 (△)、700 (■) °C、同圧力：0 kPaG。縦軸：炭素析出率 (改質器出口固体炭素/同全炭素、モルベース)、横軸：改質器入口 O/C (改質器入口全酸素/同全炭素、モルベース)。

図 4-6 粗留エタノールの水蒸気改質における炭素析出率

図 4-7 に改質器温度：600 °C、同圧力：0 kPaG の条件で O/C を変えた場合の微量有機分の残留率の変化を示す。横軸は改質器入口 O/C、縦軸は残留率を示しており、炭素析出が見られなかった O/C：1.75 以上の計算結果についてプロットしている。ここで、残留率は改質器入口に対する出口の各有機成分のモル比として定義した。

図に示すように、残留率が最も大きいメタノールでも  $10^{-4}$  のオーダーであり、いずれも 99.9 % 以上が別の化学種に変化していることが分かる。元々の模擬粗留エタノール中でも ppm オーダーの濃度であるので、改質ガス中の濃度は ppb 以下のオーダーになる。そのため、燃料電池へのこれらの有機分の影響は非常に小さく、長期間はともかく、数千時間の運転にも特に問題はないと推察される。



改質器温度：600 °C、同圧力：0 kPaG。各有機分の残留率：改質器入口各有機分/同出口各有機分。縦軸：残留率、横軸：改質器入口 O/C（改質器入口全酸素/同全炭素、モルベース）。炭素析出が生じない O/C：1.75 以上についてプロット。

図 4-5 粗留エタノール水蒸気改質における有機分残留率

## 4.2. 粗留エタノールの燃料電池燃料としての要求品質と品質課題

### 4.2.1. 燃料電池の燃料としての要求品質

SOFC に対する各種不純物成分の概算許容濃度を表 4-5 に示す[エラー! 参照元が見つかりません。]。表中の値は、劣化率 0.25%/1,000 時間（10%/40,000 時間に相当する）を確保するための各不純物成分の許容濃度を示している。ただし、これらの許容濃度の値は、SOFC のセル電極に対するもので、NEDO 燃料電池・水素技術開発ロードマップの中の要素技術開発フェーズでの目標値に相当する。なお、現在のフェーズは初期導入期であり、耐久性の目標は 10 年（90,000 時間）に引き上げられている。

表 4-5 劣化率 0.25%/1000 時間を確保するための各種不純物成分の概算許容濃度<sup>[12]</sup>

被毒物質		許容濃度	条件
アノード	硫黄(H <sub>2</sub> S, COS, CH <sub>3</sub> SH)	700 ppb	50%プレ改質メタン(S/C=2.5), 800°C (初期の性能低下分を除く)
	塩素(Cl <sub>2</sub> , HCl)	400 ppb	3%加湿水素, 800°C
	リン(PH <sub>3</sub> )	3 ppb	3%加湿水素, 800°C
		2 ppb	50%プレ改質メタン(S/C=2.5), 800°C
	ホウ素(HBO <sub>2</sub> )	5 ppb	3%加湿水素, 800°C
	シロキサン(D <sub>5</sub> )	2 ppb	3%加湿水素, 800°C, 電極面積 5000cm <sup>2</sup> の 1kW 程度のシステムを仮定
カソード	硫黄(SO <sub>2</sub> )	4 ppb	乾燥空気, LSM カソード
		0.5 ppb	乾燥空気, LSCF カソード

※ COS：硫化カルボニル, CH<sub>3</sub>SH：メチルメルカプタン（メタンチオール）, PH<sub>3</sub>：ホスフィン, HBO<sub>2</sub>：メタホウ酸, D<sub>5</sub>：デカメチルシクロペンタシロキサン

※ LSM：Mn 系ペロブスカイト, LSCF：Co 系ペロブスカイト（いずれも空気極材料）

※ これら以外にもクロム(Cr), ヒ素(AsH<sub>3</sub>), アンチモン(SbO<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)なども劣化要因となり得る。

上述したように、セルスタックに対する被毒物質や許容濃度については一定程度明らかにされているが、外部改質方式の場合にセルスタック上流に配置される改質器（改質触媒）に対する不純物の影響については、原燃料毎に含まれる不純物の種類が異なることや多様な改質触媒が存在することなどから十分明らかにされていない。

今後、対象とする粗留エタノールを用いて実際に水蒸気改質試験を実施することにより、燃料中に含まれる不純物の改質触媒への影響を明らかにする必要があるが、ここでは、既に商品化された都市ガス対応の SOFC（主に改質触媒に対する）の要求仕様を基準として、SOFC の燃料と

としての粗留エタノールに対する要求品質について整理した。表 4-6 に糖蜜由来の粗留エタノールの組成分析結果の一例と SOFC の燃料としての要求品質を示す。

表に示すように、粗留エタノールに含まれる微量元素の中で、特に被毒物質として許容濃度が規定されているのは、硫黄化合物（硫黄分）、塩素化合物、フッ素化合物であるが、原燃料中の濃

表 4-6 燃料電池(SOFC)の燃料としての要求品質

分析項目		化学式	示性式	単位	測定値 (または換算値)	許容値
アルコール分		C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	vol%	47.4%	
質量濃度					40.1%	
モル濃度					20.7%	
密度				kg/L	0.939	
エタノール量				kg/L	0.376	
水分量				kg/L	0.562	
S/C				-	1.912	-
O/C				-	2.412	-
水素発生量				m <sup>3</sup> (N)-H <sub>2</sub> /kg	1.17	-
都市ガス(13A)等量				kg/m <sup>3</sup> (N)-13A	3.85	-
蒸発残分				mg/L	47.0	-
有機 不 純 物	メタノール	CH <sub>4</sub> O	CH <sub>3</sub> OH	mg/L	30	-
	アセトアルデヒド	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	CH <sub>3</sub> CHO		114	-
	1-プロパノール	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> OH		351	-
	2-プロパノール	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	CH <sub>3</sub> CH(OH)CH <sub>3</sub>		10	-
	1-ブタノール	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> OH		13	-
	2-ブタノール	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	CH <sub>3</sub> CHOHCH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>		10	-
	2-メチル-1-プロパノール	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CHCH <sub>2</sub> OH		179	-
	1-ペンタノール	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> OH		-	-
	2-メチル-1-ブタノール	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CH(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> OH		113	-
	3-メチル-1ブタノール	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O			-	-
	アセトン	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CO		18	-
	酢酸エチル	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> COOCH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>		89	-
	シクロヘキサン	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>		91	-
	n-ペンタン	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>		10	-
有機不純物合計					1028	
硫黄分				μ g/kg	2600	1.9
微量 元 素  (無 機)	ナトリウム	Na		mg/L	1.20	-
	マグネシウム	Mg			0.46	-
	アルミニウム	Al			0.01	-
	カルシウム	Ca			0.95	-
	マンガン	Mn			0.01	-
	鉄	Fe			0.12	-
	銅	Cu			0.01	-
	カリウム	K			4.60	-
	ケイ素	Si			0.23	-
無機不純物合計					7.6	-
イ オ ン  成 分	リン酸イオン			μ g/L	1000	-
	臭化物イオン				1000	-
	フッ素イオン				22000	12
	塩素イオン				3000	22
	イオン成分合計				27000	33.7

度は、それぞれ許容濃度の 1400 倍、1800 倍、130 倍程度と非常に高い。前述のように、粗留エタノールの場合には、現行の都市ガス機で採用している乾式の不純物除去方法の適用が困難であるため、異なる方法で許容濃度未満まで低減する必要があり、対策の検討が必要である。その他の微量成分も含めて、以下で課題と対策について検討する。

#### 4.2.2. 粗留エタノールの品質課題

##### (1) 硫黄化合物

硫黄化合物は、セルスタックだけでなく改質触媒に対しても被毒物質の一つとされており、少なくとも改質器の上流で可能な限り除去しておくことが望ましい。一般に、都市ガスを燃料とする SOFC の場合には、都市ガスに含まれる腐臭剤などの硫黄化合物を除去するために、特定の低濃度硫黄化合物に対応する脱硫器（脱硫材）が設置されている。そのため、都市ガス機と同程度の耐久性を得るためには、SOFC に導入する燃料中の硫黄化合物濃度も都市ガスと同程度まで低減することが望ましい。ただし、都市ガスとバイオエタノールでは含まれる硫黄化合物の種類や濃度が大きく異なることが考えられるため、それぞれの燃料種に合わせた除去方法の検討が必要である。

表 4-7 各種の脱硫方法<sup>[13]</sup>

脱硫方式 項目	常温脱硫	水添脱硫	乾式脱硫	乾式脱硫
脱硫材名称	ゼオライト系	Ni-Mo 系+ZnO Co-Mo 系+ZnO	酸化鉄系	鉄-亜鉛酸化物系
対象硫黄種	TBM (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> S, tert-ブチルメルカプタン) , DMS (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> S, ジメチルサルファイド)		H <sub>2</sub> S (硫化水素)	H <sub>2</sub> S (硫化水素)
脱硫方式	物理吸着	化学吸着	化学吸着	化学吸着
主な反応	—	$\begin{aligned} &\text{R-CH}_2\text{SH} + \text{H}_2 \rightarrow \text{R-CH}_3 + \text{H}_2\text{S} \\ &\text{H}_2\text{S} + \text{ZnO} \rightarrow \text{ZnS} + \text{H}_2\text{O} \end{aligned}$	$\begin{aligned} &\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{Fe}_2\text{S}_3 + 3\text{H}_2\text{O} \end{aligned}$	$\begin{aligned} &\text{ZnFe}_2\text{O}_4 + 3\text{H}_2\text{S} + \text{H}_2 \rightarrow \\ &\quad \text{ZnS} + 2\text{FeS} + 4\text{H}_2\text{O} \end{aligned}$
反応温度	常温	250～300℃	常温	440～450℃
用途	都市ガス, LPG	都市ガス, LPG	バイオガス, 消化ガス	石炭ガス
適用燃料電池	固体高分子形	りん酸形	りん酸形	熔融炭酸塩型

硫黄化合物の除去方法には表 4-7 示す各種の方法があるが、バイオガスなどでは通常は取扱いの容易さや安価であることなどの理由から乾式脱硫（吸着脱硫）が用いられる<sup>[13]</sup>。また、家庭用の灯油仕様燃料電池の場合も、高圧水素の利用が困難などの理由で乾式の吸着脱硫法が用いられる<sup>[14]</sup>。ただし、吸着脱硫剤によっては、都市ガスや LPG に含まれる水分や凍結防止用に添加されるメタノール等も吸着してしまうことがあり、この場合には硫黄の吸着性能が大きく低下する<sup>[15]</sup>。一方、水添脱硫法は多様な硫黄化合物に対応可能で、吸着脱硫方式と比較して吸着容量が大きく、サブ ppm まで硫黄化合物濃度を低減できるという特長がある反面、水素を適切な割合で燃料ガスに混合する必要があることや温度管理が必要など、取扱いが容易ではないというデメリットもある<sup>[16]</sup>。その他、バイオエタノールを対象とした様々な脱硫方法も検討されているが<sup>[17]</sup>、糖蜜由来の粗留エタノールを原燃料とする SOFC システムの硫黄化合物の除去方法が確立されているわけではない。

## **(2)有機不純物**

4.1.3 項で示したように、本調査で対象とする粗留エタノールを日立造船(株)の SOFC システムに用いた場合、原燃料に含まれる有機不純物は蒸発器でほぼ完全に気化・蒸発して下流の改質器に流入する。そのため、有機不純物が蒸発器で濃縮することはないと考えられるが、蒸発器下流にある改質触媒に及ぼす影響が懸念された。しかしながら、改質器での有機不純物の挙動をプロセスシミュレーションで調べた結果、2.4 項で示したように、有機不純物のほとんどが改質器で分解され、改質器出口における残留成分はごく微量で、下流への影響は非常に小さいと考えられる。

さらに、改質条件を適切に選べば、改質器触媒上での炭素析出も抑制できることが確認された。有機不純物が炭素析出に寄与することも認められないため、粗留エタノール SOFC の実現可能性に対して有機不純物は問題にはならないと考えられる。

## **(3)無機不純物**

現状の SOFC システムでは、物理フィルター以外に粗留エタノール中の無機成分を除去する有効な方法がない。一部の無機元素については、蒸発器内に留まり堆積していくと考えられ、流路の閉塞やアルカリ腐食への寄与も懸念される。しかしながら、SOFC の特徴や装置の構造などから、定期的に装置を停止して蒸発器その他の機器をメンテナンスすることは現実的ではない。給液系統や蒸発器への無機元素の堆積を避けるためには、蒸気ボイラで実施されるような缶底ブロー等も検討する必要があるが、後述する要素試験（改質試験）および実証試験によって、これらの影響を確認する必要がある。

## **(4)蒸発残分**

表 4-6 に示すように、対象とする粗留エタノールには 47mg/L の蒸発残分が含まれている。一方、検出された無機元素とイオン元素を合わせても約 35mg/L で、蒸発残分のうち少なくとも 10mg/L 程度が同定されていない。蒸発残分のうち、今回の分析の対象以外で、どのような物質が含まれているかを強熱残分試験や EDX 元素分析等で同定しておく必要がある。

## **(5)粗留エタノール SOFC の不純物除去について**

以上のように、無機不純物については現時点で有効な分離・除去方法がない。一方、有機不純物については、プロセスシミュレーションの結果によれば、改質器で十分微量まで変性させることができるため、長期的な影響も含めて技術的な課題はほとんどないと考えられる。また、蒸発残分については、まずは成分の同定が必要である。

現状、粗留エタノール中の硫黄化合物と電解質（特に、フッ素イオンと塩素イオン）の除去については、イオン交換樹脂を検討している。一般に、イオン交換樹脂は原液に含まれるイオンと樹脂が持つイオンを交換することで原液中のイオンを取り除く装置で、除去する対象によって適した樹脂を選ぶことで選択的に対象物を除去できる。また、イオン交換樹脂は、純水の製造、硬水の軟化処理、アルコールや油脂の精製、不純物の除去など様々な用途に用いられている。ただし、イオン交換樹脂は比較的低濃度（ppm オーダー）の不純物の除去に適しており、除去対象が高濃度（%オーダー）の場合には樹脂の交換（または再生）頻度が多くなり実用的ではない。本調査で対象とする粗留エタノールの場合には、除去対象の不純物濃度が ppm オーダーであり、イオン交換樹脂メーカーの見解からも、対象とする不純物を概ね許容濃度以下まで除去できる可能性が高い。

そのため、日立造船㈱にて次年度以降にサンプルを用いた通液試験を実施して、除去性能の確認を行う予定である。その他の不純物についても、イオン交換樹脂での除去の可能性を確認するとともに、後述する改質試験で短期的な水蒸気改質性能への影響を調べた上で、実証試験で長期的な影響を確認する。



### 4.3. 粗留エタノールを使用する燃料電池の予測性能

#### 4.3.1. 粗留エタノール SOFC のプロセス諸元

20kW 級業務・産業用 SOFC の原燃料として粗留エタノールを用いる場合のアノード系統プロセスの諸元を表 4-8 に示す。下表は粗留エタノール（液体の体積濃度が 47.4%）に対して S/C（または O/C）を変化させた場合の条件を示している。表中で、S/C=1.91(O/C=2.41)の場合に改質水量が 0[L/h]になっているが、これは、改質水を加えずに粗留エタノールのみで水蒸気改質を行うことを意味する。表中には、比較のために、無水エタノールと都市ガスの場合の条件も合わせて示した。なお、表中の値は、都市ガス(13A)で 20kW 級 SOFC を運転した場合に、改質器で発生する水素量を基準として各燃料について算出した値である。

表 4-8 粗留エタノール SOFC のプロセス諸元の一例

燃料種			バイオエタノール				都市ガス (13A)
			粗留		無水		
燃料組成	エタノール	vol%	(54.5%)	47.4%		100 %	-
	メタン		-		-	-	88.9%
	エタン		-		-	-	6.8%
	プロパン		-		-	-	3.1%
	ブタン		-		-	-	1.2%
燃料流量		m <sup>3</sup> (N)h	-		-	-	3.107
		kmol/h	0.502		0.104	0.139	
		L/h	12.74		6.04	-	
S/C		-	1.50	1.91	2.00	2.50	2.00 3.00
O/C		-	2.00	2.41	2.50	3.00	2.50 3.00
改質水量		L/h	-1.55	0.00	0.32	2.20	7.50 8.75
水素発生量		m <sup>3</sup> (N))/h	←		←	←	13.975

※ 20kW 級 SOFC（都市ガス）の定格出力に相当する水素発生量を生じるとして、それぞれの燃料の流量を設定した。ただし、SOFC の燃料利用率を 75%とした。

※ 改質水量が負の値は、S/C（または O/C）を設定した値にするために、濃縮・脱水することを意味する。

理想的なエタノールの水蒸気改質反応では、 $S/C=1.5$  であるが、一般的には、改質触媒上での炭素析出等を避けるために、 $S/C \simeq 2.0$  程度が望ましいとされる。しかしながら、ここで対象とする粗留エタノールの場合には、原燃料自体で  $S/C=1.91$  であり、この条件で炭素析出が生じないで水蒸気改質が可能であれば、燃料に改質水を加える必要はなく、都市ガス機と比較してシステムが大幅に簡略化される。

本調査の中で実施したプロセスシミュレーションの結果によれば、標準的な運転条件である改質器出口温度  $600^{\circ}\text{C}$ 、改質器圧力  $0\text{kPaG}$  において、 $O/C=1.75$  以上であれば炭素の析出は認められなかった。運転条件の変化を考慮しても  $O/C=2.0$  以上であれば炭素析出の可能性は低いと考えられるが、これについても、実際の粗留エタノールを燃料とした改質試験および実証試験で確認する必要がある。

#### 4.3.2. 粗留エタノール改質ガス組成とスタック出力の推定

ここでは、粗留エタノール改質ガスの組成からスタック出力を推定する。出力の推定にあたり、まずは、一般的な SOFC の出力を決める要因について考える。SOFC 出力電圧  $V$  の一般式と常用域での近似式は次の(8)式で表される<sup>[20]</sup>。

$$V = E - \eta_{ne} - \eta_{ir} - \eta_a - \eta_c$$

$$\approx E - \eta_{ne} - (R_{ir} + R_a + R_c) \times J \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、

$V$	出力電圧	[V]
$E$	理論起電力	[V]
$\eta_{ne}$	ネルンストロス	[V]
$\eta_{ir}$	内部オーム損	[V]
$\eta_a$	アノード過電圧	[V]
$\eta_c$	カソード過電圧	[V]
$R_x$	各損失の抵抗率近似	$[\Omega\text{cm}^2]$
$J$	出力電流密度	$[\text{A}/\text{cm}^2]$

である。近似式の各項の要素のうち、燃料ガスの組成が影響するのは  $E$  (SOFC 入口の燃料・酸素濃度による)、 $\eta_{ne}$  (SOFC 内部での燃料・酸素の濃度勾配による)、 $R_a$  (SOFC 内部での燃料・酸素・生成物の主流⇄電極表面上の反応発生領域間のガス拡散性による) の3つである。

また、大気圧下 (0.101 MPaA) での水素－酸素反応型 SOFC の単セルと仮定した場合の理論起電力  $E$  (= 無負荷時の開路電圧) は次の(9)式で表される<sup>[20]</sup>。

$$E = E^\circ + \Delta E_a + \Delta E_c$$

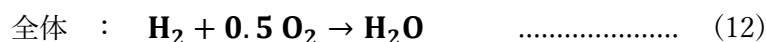
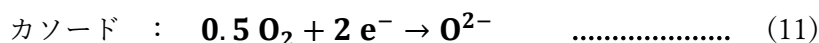
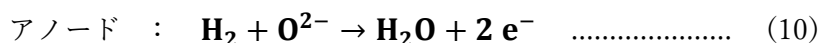
$$= E^\circ + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{H_2}}{P_{H_2O}} + \frac{RT}{2F} \ln P_{O_2}^{0.5} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで、

$E^\circ$	標準起電力	[V]
$\Delta E_a$	アノード濃度補正項	[V]
$\Delta E_c$	カソード濃度補正項	[V]
$R$	気体定数	$[\text{J}/\text{mol}\cdot\text{K}]$
$T$	絶対温度	[K]
$F$	ファラデー定数	$[\text{C}/\text{mol}]$
$P_M$	各ガス分圧 (=各ガスモル分率)	[atm]。

である。

また、水素－酸素反応型 SOFC での各極および全体反応式は次の(10)から(12)式で表される。



また、(9)式中の標準起電力  $E^\circ$  は発電反応全体の反応式と温度によって決まり、次の(13)式で表される<sup>[21]</sup>。

$$E^\circ = \frac{\Delta G}{nF} = \frac{\Delta H - T\Delta S}{2F} \dots\dots\dots (13)$$

ここで、

$\Delta G$  : 水素－酸素の発電反応前後のギブス自由エネルギー変化 [J]

$\Delta H$  : 水素－酸素の発電反応前後のエンタルピー変化 [J]

$\Delta S$  : 水素－酸素の発電反応前後のエントロピー変化 [J/K]

$n$  : 還元剤分子一つの反応によって移動する電子の当量

水素－酸素反応型では 2[-]であり、750 °C (= 1023.15 K) の場合には、 $E^\circ \approx 0.991$  V である。

次に、負荷電流がある場合について考える。負荷電流があると全体反応式の進展に伴ってセルの入口と出口で各ガスの分圧に増減が生じるが、この濃度変化は理論起電力の各極濃度補正項の値を変化させ、セル全体では起電力の低下につながる。この低下分がネルンストロス  $\eta_{ne}$  となり、次の手順で求めことができる。

単セルの入口から出口までの燃料ガスの流れ方向の位置を  $x$  とし、位置  $x$  での理論起電力  $E(x)$  は(9)式を用いて、次のように表される。

$$E(x) = E^\circ + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{\text{H}_2}(x)}{P_{\text{H}_2\text{O}}(x)} + \frac{RT}{2F} \ln P_{\text{O}_2}(x)^{0.5} \dots\dots\dots (14)$$

以上から、任意の位置  $x$  でのネルンストロス  $\eta_{ne}$  は次式で表される。

$$\eta_{ne} = E(0) - E(x) \dots\dots\dots (15)$$

単セル全体に渡ってネルンストロス  $\eta_{ne}$  を算出する場合、 $x$  方向に  $l$  個の領域に分割して、それぞれの位置での  $E(x)$  を算出し、その算術平均値  $\text{mean } E$  を用いることで簡易的に計算できる。その際、セル内の温度分布および電流分布はなくセル内に渡って均一なものとする。

前章の数値計算で得られた各燃料条件での改質ガス組成を使用し、セル温度：750 °C、燃料利用率：0.77、酸素利用率：0.5 の場合についてネルンストロス  $\eta_{ne}$  を算出する。表 4-9 に 2 条件の粗留エタノール (O/C: 2.4 および 3.0) と参考のために都市ガス (O/C: 3.0) の場合について推算した改質ガス組成を示す。O/C : 2.4 は成分未調整の粗留エタノールの場合に相当し、O/C :

3.0 は都市ガス使用時の燃料条件に合わせるように粗留エタノールに加水した場合に相当する。前章と同様に、計算には Aspen Plus を使い、改質器温度：600 °C、同圧力：0 kPaG とした。ただし、微量有機分は表から除いている。表 4-10 には各燃料条件で推算したネルンストロス  $\eta_{ne}$  などを示す。燃料側の領域分割は  $l=7$  とし、空気側は 8 つの領域（流れ方向を  $y$ 、分割数を  $m$  として  $m=8$ ）に分割して計算した。空気側は燃料側の流れに対して直交に流れており、 $x$  方向に対して一定になっているとした。なお、更に計算を簡単にするため、改質ガスはセルのアノード入口で完全に改質され、 $H_2$  と  $H_2O$  および  $CO_2$  のみになるとし、 $CO_2$  は反応に関与しないイナートガスとして扱った。

表 4-9 改質ガス組成推算

モル濃度	燃料条件		
	エタノール O/C: 2.4	エタノール O/C: 3.0	都市ガス O/C: 3.0
$H_2O$	0.2816	0.3348	0.3173
$CO_2$	0.1230	0.1210	0.0913
$CO$	0.0755	0.0604	0.0531
$H_2$	0.4671	0.4517	0.4983
$CH_4$	0.0528	0.0321	0.0399

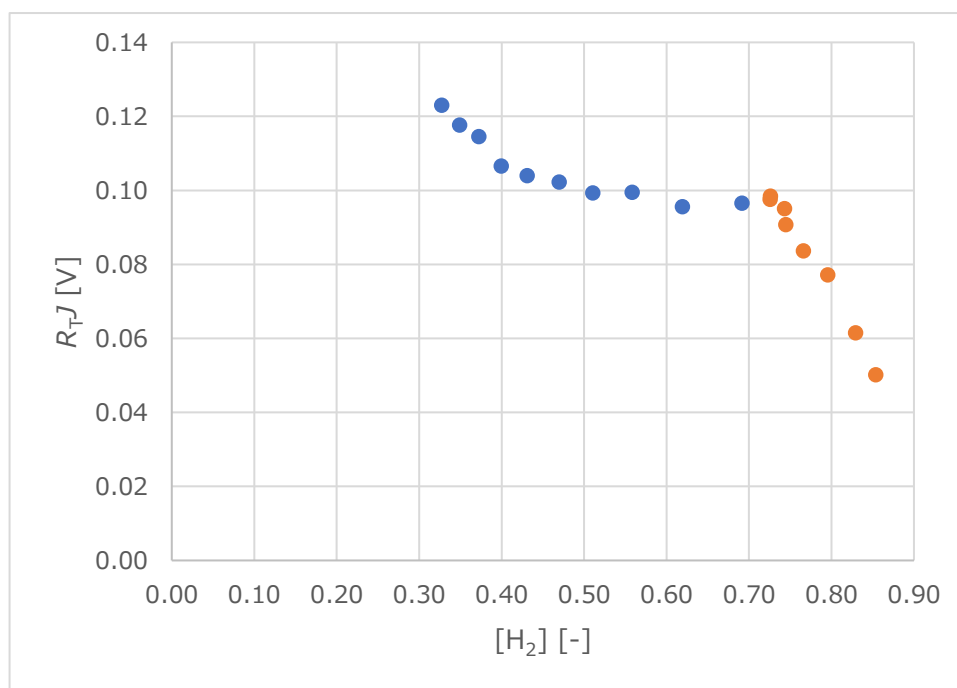
表 4-10 各燃料条件におけるネルンストロスなどの推算

起電力、 電圧降下 [V]	燃料条件		
	エタノール O/C: 2.4	エタノール O/C: 3.0	都市ガス O/C: 3.0
$E(0)$	1.045	1.005	1.016
$E(0) - E^\circ$	0.054	0.015	0.025
mean $E - E^\circ$	-0.030	-0.048	-0.043
$\eta_{ne}$	0.085	0.063	0.068
$E(0) - \eta_{ne}$	0.961	0.943	0.948

ここまでは電流密度に比例しない要素による電圧降下（(8)式の右辺第2項、ネルンストロス）を見てきたが、以降では電流密度に比例して電圧降下が大きくなる抵抗とみなせる要素による電圧降下（(8)式の右辺第3項）について考える。

過去に日立造船㈱で複数の SOFC セルを積層したスタックについて、燃料となる  $H_2$  以外に  $N_2$  や  $H_2O$  も供給し、その供給量を変化させて発電試験を実施した。その結果を図 4-8 に示す。縦軸は式(16)の  $(R_{ir} + R_a + R_c) \times J$  に相当し、 $(R_{ir} + R_a + R_c)$  を  $R_T$  に置き換えている。横軸はスタック入口のアノード供給ガス中の  $H_2$  濃度（≡分圧）であり、以降  $[H_2]$  と表記する。青いシンボルは  $H_2$  供給量と  $H_2O$  供給量を固定し、併せて供給する  $N_2$  量を変化させた場合の  $R_T J$  と  $[H_2]$  の相関を示している。橙のシンボルは、 $H_2$  供給量と  $N_2$  供給量を固定し、 $H_2O$  供給量を変化させた場合の  $R_T J$  と  $[H_2]$  の相関を示す。いずれの条件においても、電流密度、スタック雰囲気温度、アノード水素供給量、カソード空気供給量をすべて固定しており、さらに燃料利用率と酸素利用率を一定にしているため、 $R_T J$  にはアノードガス組成の変化の影響のみが表れていると考えられる。

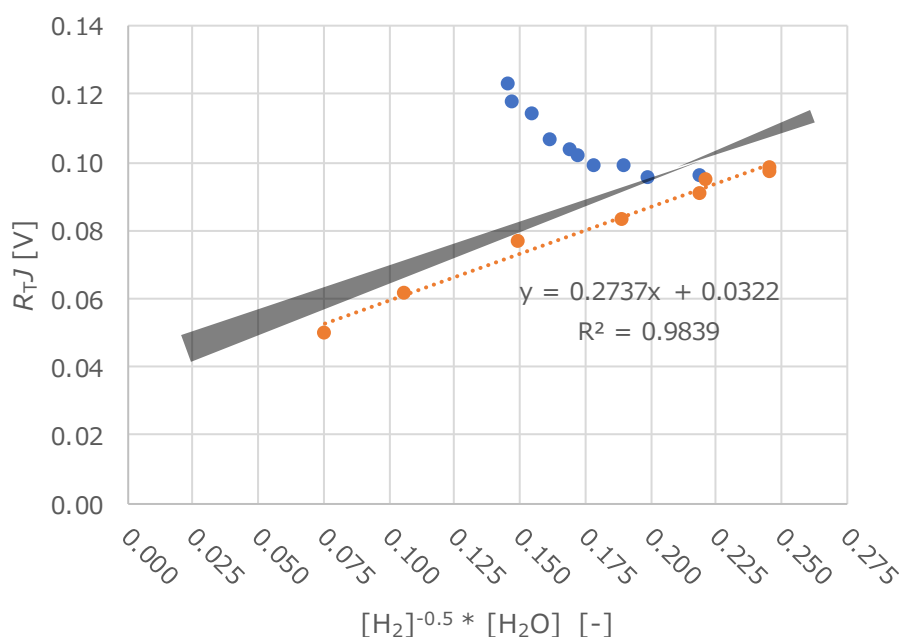
$N_2$  のみの供給量を変化させた場合には、 $R_T J$  が  $[H_2]$  に対して単調減少、かつ低い  $[H_2]$  程傾きが急になる傾向が見られる。また、実施時の条件では、 $[H_2]$  が 0.5 を超えると傾きがほぼ 0 になるものと推定できる。



実スタックを用いた発電試験から得られたアノード供給ガス中の水素濃度  $[H_2]$  と抵抗による電圧降下  $R_T J$  の相関。青色シンボル○： $H_2$  供給量と  $H_2O$  供給量固定、 $N_2$  供給量を変化させる条件、橙色シンボル○： $H_2$  供給量と  $N_2$  供給量固定、 $H_2O$  供給量変化を変化させる条件。

図 4-8 アノード供給ガス中水素濃度  $[H_2]$  と  $R_T J$  の相関

一方で  $\text{H}_2\text{O}$  を変化させた場合は、ある傾きを持った直線になっているように見える。電力中央研究所の報告<sup>[1]</sup>によれば、 $R_{\text{TJ}}$ の一部である  $R_{\text{a}}$  はアノード供給ガス中の  $[\text{H}_2]^{-0.5} \times [\text{H}_2\text{O}]$  で整理した際に直線で近似できるとされる。そこで、今回の  $R_{\text{TJ}}$  を  $[\text{H}_2]^{-0.5} \times [\text{H}_2\text{O}]$  も同様に整理して、その相関を見る。結果を図 4-9 に示すが、シンボルや試験条件は図 4-8 の場合と同じである。これを見ると、 $\text{H}_2$  と  $\text{N}_2$  の供給量を固定し、 $\text{H}_2\text{O}$  の供給量を変化させた場合は、確かに  $R_{\text{TJ}}$  が直線状にプロットできることが分かる。参考文献の試験条件は  $\text{N}_2$  を供給せずに  $\text{H}_2$  および  $\text{H}_2\text{O}$  のみの条件であり、日立造船(株)試験では  $\text{N}_2$  も供給している点で差異があるが、ある程度の範囲であれば、任意の  $\text{N}_2$  供給量についても  $R_{\text{TJ}}$  と  $[\text{H}_2]^{-0.5} \times [\text{H}_2\text{O}]$  は同様に直線状の相関を持つと予想される。その際に得られる  $R_{\text{TJ}}$  と  $[\text{H}_2]^{-0.5} \times [\text{H}_2\text{O}]$  の相関を示す直線（以降、等 $[\text{H}_2]/[\text{N}_2]$ 線とする）は、 $\text{H}_2$  と  $\text{H}_2\text{O}$  供給量を変えた場合の青いプロットの曲線（以降、等 $[\text{H}_2]/[\text{H}_2\text{O}]$ 曲線とする）と同じ供給条件の点で交わることも予想される。また、 $R_{\text{TJ}}$  中の  $R_{\text{a}}$  がアノード電極での反応発生領域間のガス拡散性に起因する抵抗成分であることから、 $\text{N}_2$  の供給量が多いほど、 $R_{\text{a}}$  は大きくなると考えられる。そのため、任意の  $\text{N}_2$  供給量での等 $[\text{H}_2]/[\text{N}_2]$ 線は、少なくとも  $[\text{H}_2]^{-0.5} \times [\text{H}_2\text{O}] : 0 \rightarrow$  今回示している等 $[\text{H}_2]/[\text{H}_2\text{O}]$ 曲線の範囲では、互いに交わることはないとする



実スタックを用いた発電試験から得られたアノード供給ガス中の  $[\text{H}_2]^{-0.5} \times [\text{H}_2\text{O}]$  と抵抗による電圧降下  $R_{\text{TJ}}$  の相関。青色シンボル○： $\text{H}_2$  供給量と  $\text{H}_2\text{O}$  供給量固定、 $\text{N}_2$  供給量を変化させる条件、橙色シンボル○： $\text{H}_2$  供給量と  $\text{N}_2$  供給量固定、 $\text{H}_2\text{O}$  供給量変化を変化させる条件。

図 4-9 アノード供給ガス中  $[\text{H}_2]^{-0.5} \times [\text{H}_2\text{O}]$  と  $R_{\text{TJ}}$  の相関

それらを考慮して、いくつかのアノードガス供給条件について等 $[H_2]/[N_2]$ 線が通りうる範囲を考える。図 4-9 には表 4-11 の条件における各等 $[H_2]/[N_2]$ 線が通ると推測される範囲を網掛けで示している。表 4-11 の模擬アノードガス組成は、表 4-9 を元にガス組成を  $H_2$ 、 $H_2O$ 、 $N_2$  のみに置き換えたものである。模擬アノードガス組成において、表 4-9 中の  $CO$  は式(17)の右側への反応が完全に進んだとし、 $CH_4$  は水蒸気改質反応と  $CO$  のシフト反応が完全に進んだとした。それらの反応に伴う増減を  $H_2$ 、 $H_2O$  へはそのまま反映し、 $CO_2$  は  $N_2$  へと置き換えている。また、模擬組成から推算される  $R_TJ$  およびセル電圧も表 4-11 に記載している。

表 4-11 のセル電圧を比較すると、エタノール O/C : 2.4 の条件では都市ガス条件比で +5 % 程度の出力増加が見込め、エタノール O/C : 3.0 では同比 -2 % 程度の出力低下が見込まれる。短期的には、都市ガスと比較してのこの程度の電圧変動は許容範囲内と考えられる。また、長期運用時に影響については、SOFC を含む燃料電池では、一定の電圧を下回った状態で発電を行うと、燃料ではなく電極部材等が反応してしまい性能が極端に劣化してしまう下限電圧が定められることが多い。また、発停を繰り返すことや連続運転を継続することにより、どうしても経年劣化が生じて同じガス条件・電流条件でも電圧は低下していく。したがって、エタノールの O/C 条件次第では都市ガスよりも早期に経年劣化でシステムの電圧が下限電圧に到達し、寿命が短くなる可能性はある。ただし、これまで様々な仮定を経てきていること、特にガス組成として完全改質ガスを想定し、かつ  $CO_2$  を反応に寄与しない  $N_2$  とみなしていることなどの影響は小さくないことから、中長期の耐久性への影響を見るには実際の燃料電池での発電試験を実施する必要がある。

表 4-11 模擬アノードガス組成と推定  $R_TJ$  および推定セル電圧  $V$

モル濃度ほか	燃料条件		
	エタノール O/C: 2.4	エタノール O/C: 3.0	都市ガス O/C: 3.0
$H_2$	0.682	0.602	0.659
$H_2O$	0.091	0.198	0.171
$N_2$	0.227	0.201	0.171
$[H_2]^{-0.5} \times [H_2O]$	0.110	0.255	0.210
$[H_2]/[N_2]$	3.00	3.00	3.86
$R_TJ[V]$	0.066	0.105	0.095
$V[V]$	0.895	0.838	0.853



## 5. エタノール改質型燃料電池の普及に向けた調査

### 5.1. 燃料電池システムコストの動向及び発電コストの見通し等の普及環境

#### 5.1.1. 燃料電池システムコストの動向

図 5-1 に家庭用燃料電池（エネファーム）の累計導入台数と販売価格の推移を示す<sup>[22]</sup>。エネファームには固体高分子形（以下、PEFC）と固体酸化物形（以下、SOFC）の 2 種類があり、PEFC は 2009 年に世界に先駆けて販売が開始され、約 3 年後の 2012 年に SOFC の販売が開始された。家庭用燃料電池は、2009 年の商用化から導入台数が年々増加し、2022 年現在の導入台数は累計約 440,000 万台である。導入台数の増加に伴い、販売価格は順調に低下しており、2020 年現在では PEFC 形で 123 万円/kW 程度、SOFC 形で 144 万円/kW 程度である。なお、ここで示した出力当たりの設備価格は、家庭用燃料電池の単機出力を 700W として算出した値で、装置の販売価格は 2020 年現在で、PEFC：86 万円、SOFC：101 万円とされる<sup>[22]</sup>。ただし、実際の価格はメーカーや機能等によっても異なる。

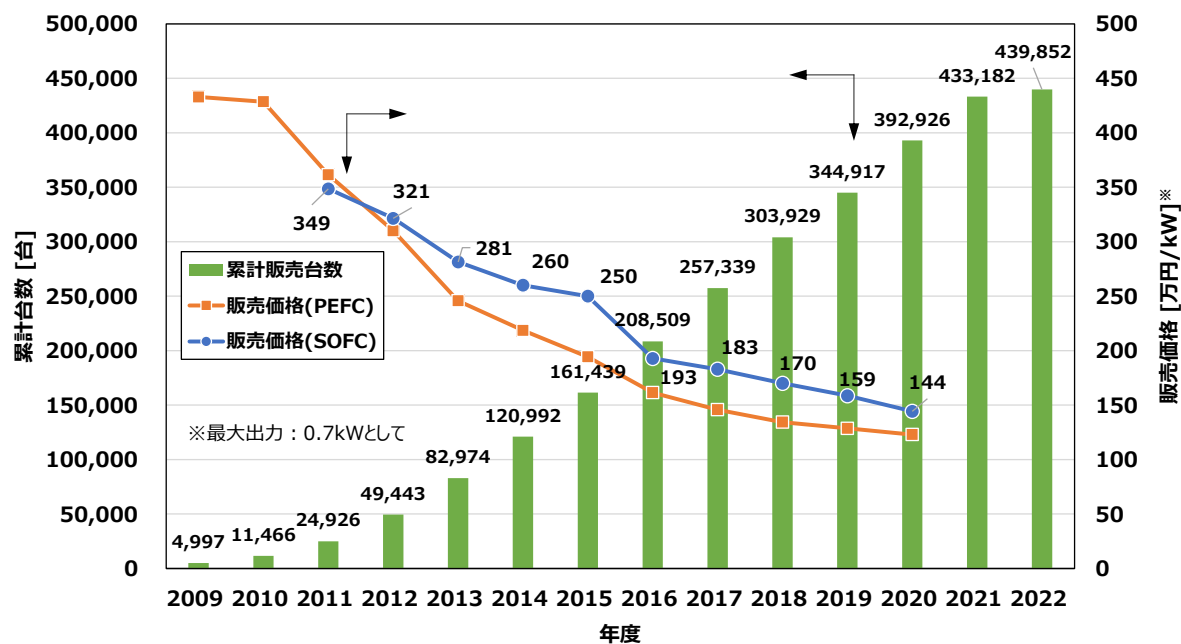


図 5-1 燃料電池（家庭用）の導入台数と価格の推移<sup>[22]</sup>

一方、業務・産業用燃料電池については、NEDO（（国研）新エネルギー・産業技術総合開発機構）燃料電池・水素技術開発ロードマップにおいて、数 kW～数 100kW の出力域の装置について「達成性能レベル」として表 5-1 に示す値が示されている<sup>[23]</sup>。なお、表中のシステム価格における低圧、高圧の分類については、低圧は数 kW 級、高圧は数 10kW～数 100kW 級として分類されている。

文献[23]には、業務・産業用 SOFC は発電効率が高い特徴を活かし、家庭用燃料電池と同等以上の発電効率を目指す。また、システム価格については、競合製品となるガスエンジンなどに比べて優位性が低いことから一層の経済性の向上が必要とされる、との記載がある。しかしながら、業務・産業用 SOFC メーカー各社の販売価格が明らかにされていないことがほとんどで、現在のシステム価格が 100 万円/kW であるかどうかは不明である。

表 5-1 達成性能レベル（業務・産業用：SOFC （数十～数 100kW））<sup>[23]</sup>

項目	現在	2025 年頃	2030 年頃	2040 年頃
発電効率	50～ 55%	55%以上	60%以上	70%以上
耐久性	10 年	10 年以上	15 年	15 年以上
システム 価格	100 万円/kW	低圧:100 万円/kW 以下 高圧: 50 万円/kW	低圧:50 万円/kW 高圧:30 万円/kW	低圧:50 万円/kW 以下 高圧:30 万円/kW 以下

なお、文献[23]の中では、今後の開発課題として、低コスト化以外にも実用化技術の一つとしてカーボンニュートラル(CN)燃料対応に向けた実証試験が必要であるとし、バイオガスや水素混合燃料、複数燃料切り替えへの対応等が示されている。さらに、長期的には SOFC の純水素対応や CN メタンへ等への対応など、CN 燃料への適用も求められている。

### 5.1.2. 燃料電池システムの発電コスト

ここでは、粗留エタノールを原燃料とした SOFC 発電システムの発電コストを試算した。試算に用いた条件を表 5-2 に示す。ここでは、運転年数(n)を 10 年とし、その間の稼働率を仮に

表 5-2 発電原価の計算条件

項目	条件
発電電力	18 kW
発電効率	50 %
稼働率	100 %
運転年数	10 年
割引率（年経費率）	4.0 %
運転経費	3.0 円/kWh
排熱回収メリット	0.0 円/kWh

100%とした。実際には、設備の定期点検その他への対応のために、年に数日程度の運転停止期間があるとも考えられるが、基本的に SOFC は連続運転で運用されることが多いことから、ここでは運転停止期間を考慮しない。また、日立造船(株)の SOFC はコージェネレーションモードでの運用も可能であるが、ここでは排熱回収メリットをなし（熱利用しない）とした。

以上の条件を用いて(16)式によって発電コストを算出した。ただし、発電原価には燃料製造設備のコストを含めていない。

$$[\text{発電原価}] = \frac{[\text{設備価格} \times \text{年間経費率}] + [\text{年間燃料費}] + [\text{年間運転経費}] - [\text{排熱利用メリット}]}{[\text{年間総発電電力}]}$$

・・・・・・・・・・・・・・・・ (16)

ここで、(16)式中の年間経費率( $\alpha$ )は、以下の(17)式から求め、

$$\alpha = r / \{1 - (1 + r)^{-n}\}$$

・・・・・・・・・・・・・・・・ (17)

$r$  : 割引率（利子率） [%]  
 $n$  : 運転年数 [年]

である。

エタノール SOFC の発電原価の試算例を図 5-2 に示す。横軸は粗留エタノール（体積濃度が 47.4%）の 1 リットル当たりの価格、縦軸が粗留エタノール SOFC の発電原価である。また、図中のパラメータは粗留エタノール SOFC の設備価格（1kW 当りの価格）である。

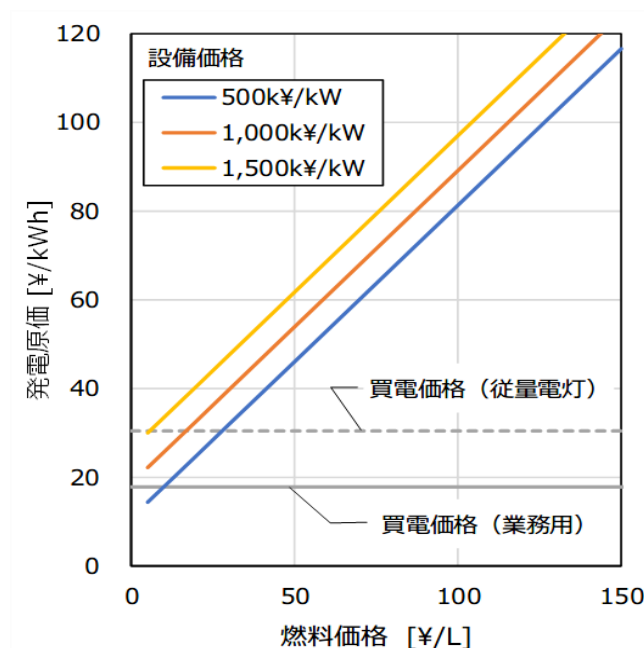


図 5-2 エタノール SOFC の発電原価

また、比較対象の商用系統電力価格（買電価格）として、表 5-3（業務用）および表 5-4（従量電灯）に示す 2023 年 2 月現在の沖縄電力の電気料金表を引用し<sup>[24][25]</sup>、合わせて図中に示した。図に示すように、SOFC の設備価格が表 4-1 に示す NEDO 達成目標の一つである 50 万円/kW とした場合でも、粗留エタノール SOFC の発電原価は、燃料費が 30 円/L で低圧（電灯従量）と同等、10 円/L で高圧（業務用）の買電価格と同等になる。現時点での国内産の粗留バイオエタノールの価格を評価することは難しいが、バイオエタノールの輸入価格が 65～75 円/L<sup>[26]</sup>であることを考慮すると、低濃度であったとしても、現時点でグリッドパリティを実現することは容易ではない。

しかしながら、島嶼地域の人々の生活に必要な不可欠であるエネルギーは、その資源のほとんどを島外に依存しており、原油価格等、外的な要因による影響を受けやすく、輸送コストを含むエネルギーコストは市民生活の負担となっている。将来的にはさらなる負担増を招くリスクが存在しており、地産地消の再生可能エネルギーであるバイオエタノールを有効利用することは、エネルギーの低炭素化のみならず、電源セキュリティの確保やレジリエンスへの対応など、価格面以外の導入メリットも大きいと考える。

表 5-3 買電原単位（業務用）<sup>[24]</sup>

項目		料金
基本料金		1481.98 円/kW
従量料金	（夏季）	17.15 円/kWh
	（その他季）	15.66 円/kWh
電気料金総額（夏季料金）		3,024,319 円/年
買電原単位		19.2 円/kWh

表 5-4 買電原単位（従量電灯）<sup>[25]</sup>

項目		料金
基本料金	最初の 10(15)kWh まで	402.40 円/kW
従量料金	10(15)kWh から 120kWh まで	22.95 円/kWh
	120kWh から 300kWh まで	28.49 円/kWh
	300kWh を超える部分	30.47 円/kWh
電気料金総額		4,802,210 円/年
買電原単位		30.5 円/kWh

## 5.2. 燃料電池の実証及び導入先の調査と導入スケジュール

### 5.2.1. SOFC 実証機導入に向けた課題と対応

#### (1) 粗留バイオエタノール改質試験

第4章で示したとおり、本調査で対象とするバイオエタノール中の不純物について、プロセスシミュレーションの結果では、微量の有機成分は問題なく蒸発器で蒸発・気化されること、さらに改質器でごく微量まで変性されること、さらには O/C を適切に管理すれば、炭素析出が抑制されることが示された。しかしながら、粗留エタノールの成分分析結果では、約 40mg/L の蒸発残分が検出されており、検出された無機成分を除いても約 30mg/L の未蒸発不純物が含まれていることになる。また、無機成分については、ほとんどの成分が蒸発器に堆積していくものと考えられ、SOFC の長期運転の際の挙動が懸念される。そのため、実際に粗留エタノールを使用して SOFC 発電システムで実証運転を行う前に、実液を使って水素改質特性を確認しておく必要がある。

この装置は、20kW 級 SOFC 発電システムの約 1/5 規模で、実装置の発電部分以外を模擬した日立造船(株)が開発した試験装置である。この装置は、燃料供給系、蒸発器、水蒸気改質器、およびオフガス燃焼器（改質ガス除害器）等で構成される。

本改質試験装置では、対象とする粗留エタノールを試験装置に供給して蒸発器で加熱・蒸発、改質器で水蒸気改質させることで、実装置の運転を模擬できる。そして、装置内の各点でガス成分を採取・分析することで、各機器で生じている現象を把握することが可能である。これにより、本調査の検討結果を確認し、粗留エタノール SOFC の技術的な実現可能性を再評価するとともに、実証運転のための制御・運転パラメータの同定も可能になる。

## (2) 粗留バイオエタノールによる SOFC 実証運転

前術の改質試験で粗留エタノールを SOFC に適用する際の技術的課題が解決された後、長期的な発電性能および耐久性を確認するために、実際の 20kW 級 SOFC 発電装置を粗留エタノール製造設備付近に設置し、実証運転（長期連続運転）を実施する必要がある。

20kW 級 SOFC 発電装置の設置例と装置のシステムフロー図をそれぞれ図 5-3、図 5-4 に、発電装置の主な仕様を表 5-5 に示す。これらは、いずれも都市ガス対応の SOFC 発電装置について示したもので、電力と合わせて熱供給も可能なコージェネレーションシステムの例である。

本装置は、補機ユニット、コントロールユニット、ホットモジュールユニット、および排熱回収ユニットの 4 つのユニットからなり、それぞれのユニットを分割した状態、または共通台盤上に一体として組立てた状態のいずれの方式でも現地に搬入して据付することが可能である。また、基本的には屋外設置を想定しているが、設備側に給排気設備を設けることで、屋内への設置も可能である。



図 5-3 SOFC 発電装置の一例（都市ガス用 SOFC 発電装置）

本装置には、前述の水素改質システムその他、パワーコンディショナ・動力制御盤などの制御装置、燃料以外のユーティリティ供給系、燃料電池本体を含む高温機器を収容するホットモジュール、SOFC の排ガスから排熱を回収して温水を発生させるとともに、排ガス中の水蒸気を分離・回収して改質水として再利用するための装置等が備えられている。このように、本装置には SOFC の運転に必要な機器・装置が全て含まれており、本装置に必要なユーティリティを接続するだけで発電運転が可能なパッケージとして供給できる。

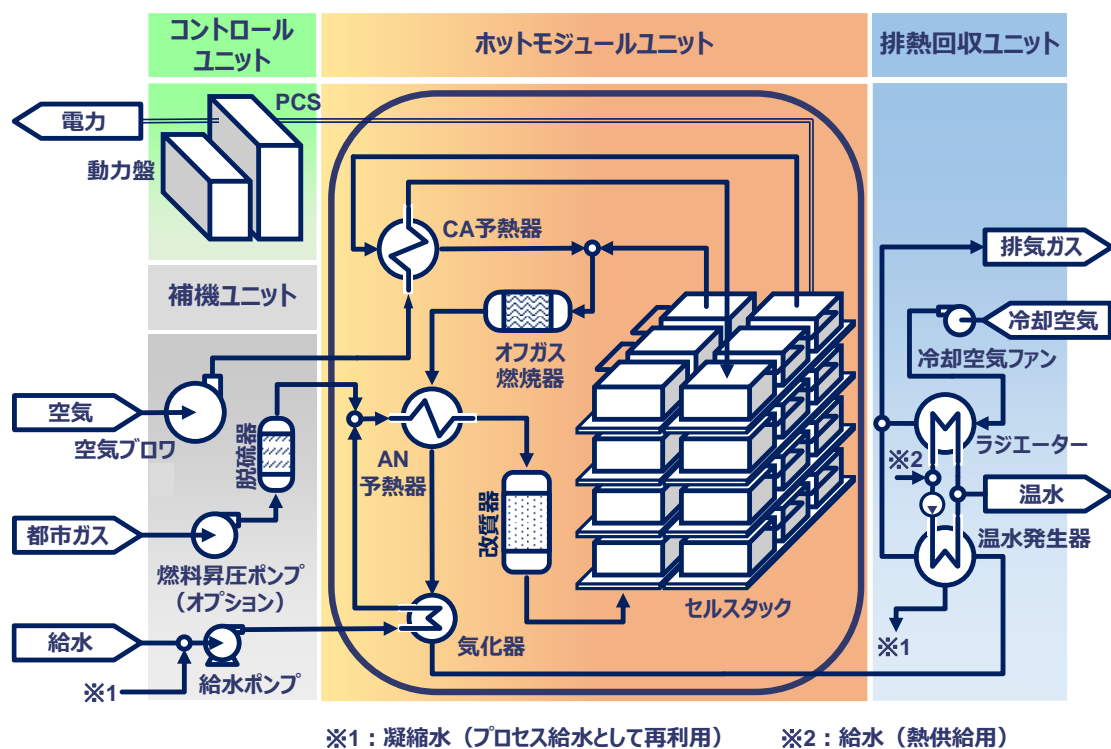


図 5-4 SOFC 発電装置のシステムフロー図（都市ガス機）

なお、本装置は都市ガス機として開発されたもので、現在バイオガス等のカーボンニュートラル燃料への適用範囲の拡大を進めているものの、これまでにバイオエタノールでの運転実績はない。ここで対象としている粗留エタノールを原燃料として用いる場合でも、本装置の構成機器は概ねそのまま用いることが可能だと考えられ、水素改質システムが都市ガス機と同等の改質性能であることが確認できれば、短期的な性能については特に大きな問題はないとも考えられる。しかしながら、エタノール濃度や不純物濃度など燃料組成の変動や無機不純物、蒸発残分の装置内各機器への長期的な影響など、現時点では評価が困難な事項もある。

表 5-5 20kW 級 SOFC の基本仕様（都市ガス仕様の場合）

項目	仕様
燃料電池形式	固体酸化物形
構造	パッケージ形（一体形／分割形）、屋外仕様
使用燃料	都市ガス(13A) ※1
本体寸法	1,800 mm(W)×3,600 mm(L)×2,200 mm(H) (雨除けフード及び遮音板は除外)
本体重量	約 6,000 kg
設計水平震度	0.3 G
定格出力※2（発電端）	20 kW（初期）
電圧（標準）／周波数	3 相 3 線 202 V ±20 / 50Hz または 60 Hz
騒音（機側 1m）	約 67 dB(A)
発電効率※2（送電端、LHV 基準）	初期定格運転時：50 %, 5 年平均：48.5 %（推定値）
総合熱効率※2※3（LHV 基準）	約 90 %（初期）
パッケージ排気流量	約 1200 m <sup>3</sup> (N)/h
パッケージ排ガス温度	約 58 ° C
NO <sub>x</sub> 排出濃度	0.5 ppm 以下
SO <sub>x</sub> 排出濃度	検出下限値以下
排水量	最大 4.5 kg/h（無圧、冬季運転時の推算、液性：pH 4.7）



### (3) 実機適用のための課題

本調査の結果、今後さらに調査・検討が必要な課題について、以下に整理する。

#### ①燃料組成の変動

燃料濃度がある一定の範囲（発熱量ベースで）から大きく外れる場合、発熱量の低下はセルスタックの燃料不足による破損を、発熱量の上昇は燃焼器の負荷上昇による燃焼触媒の破損を引き起こす可能性がある。そのため、例えばバイオガスに対しては、メタン濃度の下限や変動幅に一定の制約を設け、その範囲を逸脱する場合には、装置を停止させるなどの機能を設けている。

対象とする粗留エタノールの製造側の条件（発熱量の変動幅、頻度等）によっては、そのままでは SOFC の運転に適さない場合もある。燃料側の条件の確認と必要ならばその対策の検討が必要である。

#### ②無機不純物・蒸発残分に対する対応

対象とする粗留エタノールには 47mg/L の蒸発残分が含まれている。一方、検出された無機元素とイオン元素を合わせても約 35mg/L で、現時点で蒸発残分のうち少なくとも 10mg/L 程度が同定されていない。今回の分析の対象以外で、どのような物質が含まれているかを同定しておく必要がある。

現状の SOFC システムでは、粗留エタノール中の無機成分を除去する有効な方法はない。一部の無機元素については、蒸発器内に留まり堆積していくと考えられ、流路の閉塞やアルカリ腐食への寄与も懸念される。しかしながら、SOFC の特徴や装置の構造などから、定期的に装置を停止して蒸発器その他の機器をメンテナンスすることは現実的ではない。給液系統や蒸発器への無機元素の堆積を避けるためには、蒸気ボイラで実施されるような缶底ブロー等も検討する必要があるが、後述する要素試験（改質試験）および実証試験によって、これらの影響を確認する必要がある。

#### ③凝縮水の利用（水自立機能の有効利用）

本装置は、排気中の水蒸気を凝縮・回収して改質水として再利用する、いわゆる「水自立機能」をもっている。本調査の対象のシステムの場合には、含水エタノール（粗留エタノール）が原燃料として供給されるので、SOFC としては水蒸気を凝縮・回収して再利用する必要はない。しかしながら、供給された水をそのまま水蒸気として大気中に排気することはエネルギーの有効利用の観点から好ましくない。そのため、SOFC の排熱を回収して熱供給するとともに、回収した凝縮水も別のプロセスで利用するなど、システム全体として効率的な運用システムの構築を検討すべきである。

### 5.2.2. SOFC 実証機の導入先及び導入スケジュールの検討

SOFC 実証機導入先の選定に当たっては、

- SOFC は基本的には最高効率点（定格 20kw）での連続運転が望ましい。
- 運用方法としては、ベースロード運転(20kw)で運転し、不足分は常に系統電源から供給しておく。（SOFC 故障時の系統電源からの供給バックアップ体制）
- SOFC で例えば夜間に余剰電力が発生する場合でも、EV 充電設備を設け EV に充電活用できるようにすることで、導入先の幅が広がる。
- SOFC の効率的運用のためには、発生する熱の有効活用が可能な施設が望ましい。

などを視点として、今後検討を進める必要があるが、導入先として考えられるのは、宮古島市の公共施設としては、

- JTA ドーム宮古島（宮古島市スポーツ観光交流拠点施設）
- 宮古島市立図書館
- 宮古島市本庁舎
- 市営集合住宅

更には、大型スーパー、ホテル、更には、県立宮古病院など幅広く SOFC の導入が期待できるものと考えられる。

今後の具体的な実証機導入先などについては、今後、沖縄県、宮古島市の協力も得て進めていくことにしたい。

また、具体的な導入スケジュールについては、クリアすべき課題が残されており、明確な設定は難しいが、課題が順調にクリアしていくとすると、概ね図 5-5 のスケジュールの通り、3 年間の実証期間を得て 4 年目以降に導入開始になるものと考えられる。

項 目	1 年 目	2 年 目	3 年 目	4 年 目	5 年 目
<b>(1) エタノール改質型 SOFC の技術実証</b>					
①粗留エタノールの改質試験	→				
②SOFC 実機による実証運転		→	→	→	
<b>(2) SOFC の導入開始及び普及拡大</b>				→	→

図 5-5 SOFC 導入に向けた概略スケジュール

## 6. バイオエタノール原料用バイオマス資源の調査及び再エネ電力の推計

### 6.1. バイオマス資源の概要と利活用の方向性

離島においてバイオエタノール製造用として利用可能な資源作物としては、宮古島にてバイオエタノール製造実績のある製糖工場から産出される糖蜜を対象とするが、糖蜜だけでは製造可能なバイオエタノール量に限りがあることから、新たな資源作物として、下記に示すバイオエタノール製造用資源作物として適正条件を有するスイートソルガムも対象として調査を進める。

また、スイートソルガムをバイオエタノール製造用として利用する際には、搾汁残渣（以下、バガスと呼ぶ）が発生するが、本調査ではバイオマス発電用燃料として評価することとする。

- スイートソルガム搾汁液にはサトウキビに匹敵する糖分が含まれている。
- サトウキビと比べて生育可能地域が広く、国内、海外の広い地域で生育可能。
- 根は深根性で耐乾性が強く、半乾燥地域でも生育可能。
- 過湿土壌、幅広い土壌pHでも比較的良好に生育し、環境適応能力が高い。
- スイートソルガムの生育期間が4～5ヶ月であるのに対し、サトウキビは12～18ヶ月である。このためスイートソルガムは、理論上は二期作が可能であることから、単位当たり面積の収穫量が向上する可能性がある。
- 成長速度が速いため、図6-1に示すように、夏植えサトウキビの間作として農地の有効利用が可能なことから、サトウキビの持つ食料生産機能を阻害することなく耕種農業の土地生産性を高めサトウキビ農家の収入増加に貢献。

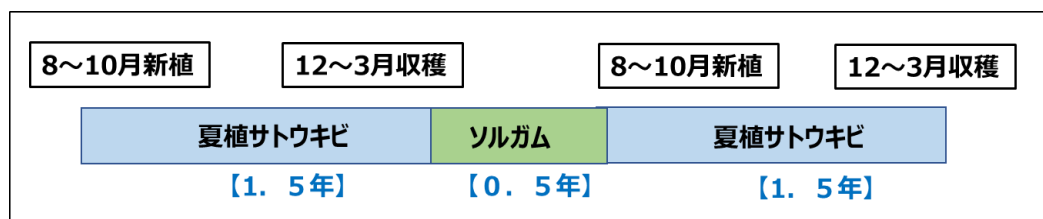


図 6-1 夏植えサトウキビの間作利用

尚、糖蜜はその約70%は飼料として取引されているが、食料（砂糖）と競合しないためその全量をエネルギー源として使用可能とするが、スイートソルガムについては、サトウキビ畑を利用しての栽培となり、食料（砂糖）と競合することから、夏植えサトウキビの間作利用の栽培を前提とする。

## 6.2. 離島におけるバイオマス資源量の概要

### 6.2.1. 糖蜜

離島における糖蜜資源量は単年度で見ると、台風などの気象影響により大きく変動していることから、直近3年間（R1/R2 年、R2/R3 年、R3/R4 年）の平均値を採用することとする。表 6-1～表 6-5 に過去3年間の各離島のサトウキビ及び糖蜜の生産実績を示す。

糖蜜の産出量は宮古島が 10,174ton と最も多く、次に南大東島 3,825ton、石垣島 2,870ton、久米島 1,860ton、北大東島 1,015ton の順となっている。

対象地域としては、糖蜜が産出される分蜜糖工場があり、かつ沖縄電力の内燃式発電所が存在している5島（宮古島、石垣島、久米島、南大東島、北大東島）とした。

尚、生産実績は沖縄県の統計資料「さとうきび及び甘しゅ糖生産実績」を参考にした。

表 6-1 宮古島のサトウキビ及び糖蜜生産実績

生産期		R1/R2	R2/R3	R3/R4	3年平均
収穫面積(ha)	夏植え	1,935	1,778	2,085	1,933
	春植え	275	353	321	316
	株出し	2,874	2,740	3,159	2,924
	合計	5,084	4,871	5,565	5,173
サトウキビ生産量(ton)		246,506	327,095	330,308	301,303
単収(ton/ha)		48	67	59	58
糖蜜生産量(ton)		7,634	10,357	12,532	10,174

表 6-2 石垣島のサトウキビ及び糖蜜生産実績

生産期		R1/R2	R2/R3	R3/R4	3年平均
収穫面積(ha)	夏植え	495	487	479	487
	春植え	135	202	198	178
	株出し	667	647	829	714
	合計	1,297	1,336	1,506	1,380
サトウキビ生産量(ton)		67,101	85,658	99,530	84,096
単収(ton/ha)		52	64	66	61
糖蜜生産量(ton)		1,999	3,065	3,547	2,870

表 6-3 久米島のサトウキビ及び糖蜜生産実績

生産期		R1/R2	R2/R3	R3/R4	3年平均
収穫面積(ha)	夏植え	146	177	131	151
	春植え	114	150	112	125
	株出し	670	654	667	664
	合計	930	981	910	940
サトウキビ生産量(ton)		46,938	49,164	50,573	48,892
単収(ton/ha)		50	50	56	52
糖蜜生産量(ton)		1,620	2,247	1,714	1,860

表 6-4 南大東島のサトウキビ及び糖蜜生産実績

生産期		R1/R2	R2/R3	R3/R4	3年平均
収穫面積(ha)	夏植え	62	54	44	53
	春植え	221	169	196	195
	株出し	991	1,073	1,062	1,042
	合計	1,274	1,296	1,302	1,291
サトウキビ生産量(ton)		103,820	105,998	81,968	97,262
単収(ton/ha)		81	82	63	75
糖蜜生産量(ton)		3,981	4,031	3,462	3,825

表 6-5 北大東島のサトウキビ及び糖蜜生産実績

生産期		R1/R2	R2/R3	R3/R4	3年平均
収穫面積(ha)	夏植え	35	38	27	33
	春植え	64	54	46	55
	株出し	293	312	318	308
	合計	392	404	391	396
サトウキビ生産量(ton)		28,942	27,724	23,176	26,614
単収(ton/ha)		74	69	59	67
糖蜜生産量(ton)		1,078	997	969	1,015

### 6.2.2. スイートソルガム及びソルガム搾汁残渣（バガス）

スイートソルガム及びバガスの資源量は、スイートソルガム栽培を夏植えサトウキビ畑の休耕期間を活用する前提として、下記式により推計した。

$$\text{ソルガム資源量(ton/年)} = \text{夏植えサトウキビ収穫面積(ha)} \times \text{単収(ton/ha)}$$

$$\text{バガス資源量(ton/年)} = \text{夏植えサトウキビ収穫面積(ha)} \times \text{収量(ton/ha)}$$

推計結果を表 6-6 に示すが、資源量は夏植えサトウキビ収穫面積に比例することから、宮古島が最も多く、以下、石垣島、久米島、南大東島、北大東島の順となっている。

南大東島は、サトウキビ生産量では宮古島の次に多いが、株だしが主で、夏植えは収穫面積の4%程度のためスイートソルガムの資源量が少い結果となっている。

尚、スイートソルガムの単収は品種により違いがあるが、本調査では比較的単収の高いスーパーソルガムを前提とし、茎単収は90(ton/ha)、スイートソルガムの搾汁により発生するバガスの収量は乾ベースで20(ton/ha)とした。

表 6-6 スイートソルガム及びバガスの資源量の推計結果

	項 目	単位	宮古島	石垣島	久米島	南大東島	北大東島
スイート ソルガム	収穫面積	ha	1,933	487	151	53	33
	単収	ton/ha	90	90	90	90	90
	収穫量	ton/年	173,940	43,830	13,590	4,770	2,970
バガス	収量	ton/ha	20	20	20	20	20
	産出量	ton/年	38,650	9,740	3,020	1,060	660

## 6.3. バイオマス資源のエネルギー変換量の推計

### 6.3.1. 推計結果の概要

各離島における糖蜜及びスイートソルガム由来の粗留エタノールを SOFC で燃料利用した場合の再エネ電力量、スイートソルガム搾汁残渣のバガスでのバイオマス発電量及び再エネ電源比率の推計結果の概要を図 6-3 に示す。

- 宮古島は糖蜜産出量が最も多く、またスイートソルガムの収穫面積も広いことから、再エネ電力量が最も多い地区であり、再エネ電源比率は 19%と推計された。
- その他離島で特徴的なのは、南北大東島は再エネ電力量は少ないものの再エネ電源比率は、宮古島のように商業施設や観光関連施設が少なくサトウキビ生産量対比の電力需要量が低くなることから、南大東島 47%、北大東島 30%と大きくなっている。

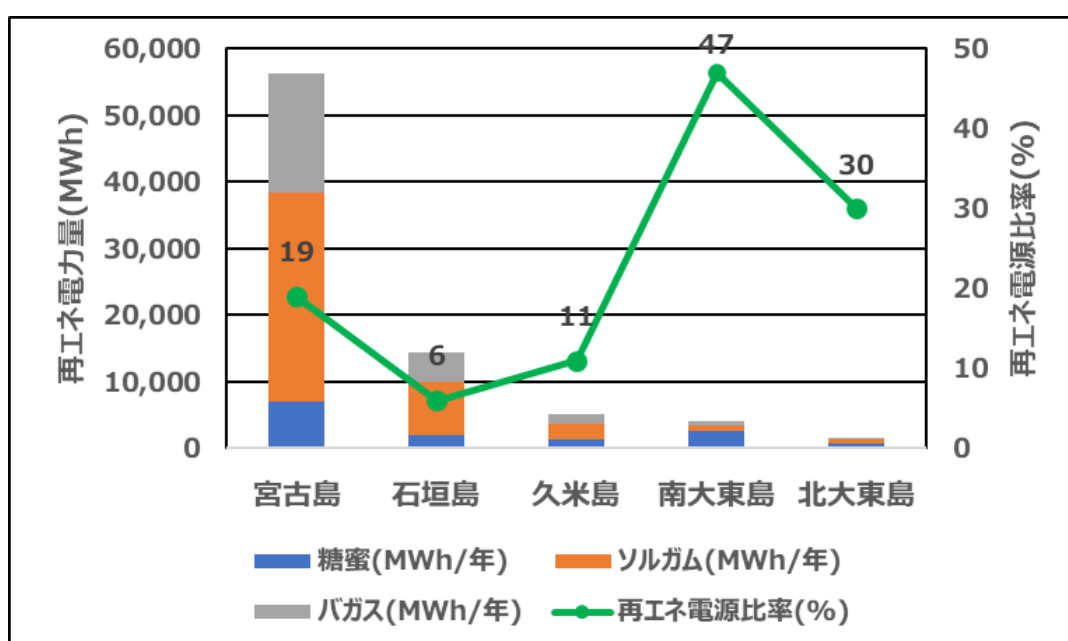


図 6-3 離島における再エネ電力量及び再エネ電源比率

尚、再エネ電源比率推計に当たり、各離島の電力需要量は表 6-7 の 2020 年度実績を使用した。

表 6-7 2020 年度電力需要量の実績

	単位	宮古島	石垣島	久米島	南大東島	北大東島
電力需要量(2020年度実績)	MWh/年	285,309	288,358	45,916	8,454	5,103

(出所：沖縄県離島関係資料令和 4 年 3 月版)

### 6.3.2. バイオマス資源量及び再エネ電力量の推計結果

各離島におけるバイオエタノール製造用バイオマス資源量、バイオマスのバイオエタノール変換量、再エネ電力量（SOFC 発電量）の推計方法を表 6-8、推計結果の詳細を表 6-9 に示す。

表 6-8 バイオエタノール変換量及び再エネ電力量の推計方法

バイオマス名	バイオエタノール変換量及びSOFC発電量の推計方法
糖蜜	●バイオエタノール変換量(L/年)＝糖蜜産出量(ton/年)×エタノール変換率(L/ton) ●SOFC発電量(MWh/年)＝バイオエタノール変換量(L/年)×SOFC発電率(kWh/L)÷1,000
スイート ソルガム	●ソルガム収穫量(ton/年)＝夏植えサトウキビ収穫面積(ha)×単収(ton/ha)×収穫回数(回/年) ●バイオエタノール変換量(L/年)＝ソルガム収穫量(ton/年)×エタノール変換率(L/ton) ●SOFC発電量(MWh/年)＝バイオエタノール変換量(L/年)×SOFC発電率(kWh/L)÷1,000

表 6-9 各離島の再エネ電力量と再エネ電源比率

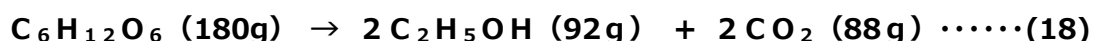
バイオマス名	項 目	単位	宮古島	石垣島	久米島	南大東島	北大東島
糖蜜	産出量	ton/年	10,174	2,870	1,860	3,825	1,015
	エタノール変換量	L/年	2,340,020	660,100	427,800	879,750	233,450
	SOFC発電量	MWh/年	7,020	1,980	1,283	2,639	700
	再エネ電源比率	%	2	1	3	31	14
スイート ソルガム	収穫量	ton/年	173,940	43,830	13,590	4,770	2,970
	エタノール変換量	L/年	10,436,400	2,629,800	815,400	286,200	178,200
	SOFC発電量	MWh/年	31,309	7,889	2,446	859	535
	再エネ電源比率	%	11	3	5	10	10
バガス	バガス産出量	ton/年	38,650	9,740	3,020	1,060	660
	売電量	MWh/年	17,934	4,519	1,401	492	306
	再エネ電源比率	%	6	2	3	6	6
合計	再エネ発電量	MWh/年	56,263	9,870	3,730	3,498	1,235
	再エネ電源比率	%	19	6	11	47	30

尚、各バイオマスからのバイオエタノール変換量及び再エネ電力算出に当たっての各変換率は、以下の式の通り試算した。



(1)糖蜜のエタノール変換率

エタノール発酵の反応式は、糖分をグルコースで代表すると、式(18)のように表され、グルコース 180g からエタノール 92g、炭酸ガス 88g が得られ、理論上はグルコースの 51%がエタノールに転換されることになる。



ここで、糖蜜の糖分を 40%、発酵歩合を 90%、エタノール比重を 0.8 とすると、式(19)により、糖蜜のエタノール変換率は 230L/ton となる。

$$1,000\text{kg} \times 40\% \times 51\% \times 90\% \div 0.8 = \underline{230 \text{ L/ton}} \cdots\cdots (19)$$

(2)スイートソルガムのエタノール変換率

スイートソルガムからバイオエタノールを生産する場合は、収穫した茎を圧搾して搾汁液を取り、エタノール発酵を行うことになる。スイートソルガム茎の搾汁率を 70%、その搾汁液の糖度を 15%、糖蜜と同じ発酵条件（発酵による糖→エタノール変換率 51%、発酵効率 90%）、エタノール比重 0.8 とすると、式(20)により、スイートソルガム茎のエタノール変換率は 60L/ton となる。

$$1,000 \text{ kg} \times 70\% \times 15\% \times 51\% \times 90\% \div 0.8 = \underline{60 \text{ L/ton}} \cdots\cdots (20)$$

(3)エタノールの SOFC 電力変換率

SOFC におけるエタノールの電力変換率はエタノールの低位発熱量 21.2MJ/L、SOFC の発電端効率を 50.6%（日立造船㈱の公表データ）とすると、式(21)により、3KWh/L となる。

$$21.2 \text{ MJ/L} \times 0.506 \div 3.6 \text{ MJ/kwh} = \underline{3 \text{ kwh/L}} \cdots\cdots(21)$$

(4)バガスの電力変換率

バガスの電力変換率はバガスをボイラーで燃焼し、発生したスチームで発電するスキームを想定し、バガス保有熱 8,360MJ/ton の 20%相当量（場内消費分差し引き後）を系統電源に送電するとして、式(22)により、464kwh/ton となる。

$$8,360\text{MJ/ton} \times 0.2 \div 3.6 \text{ MJ/kwh} = \underline{464 \text{ kwh/ton}} \cdots\cdots (22)$$

#### 6.4. 久米島町の 2050 年脱炭素化に向けた取組

久米島町の 2050 年脱炭素化に向けた取組状況のヒヤリングと本調査事業の宮古島再エネモデルの久米島町への展開などについて、以下の通り意見交換を行った。

(1)打合せ日時：2022 年 10 月 3 日 13:30～15:30

(2)場所：久米島町役場

(3)対応者

プロジェクト推進課：江洲誠一郎氏

産業振興課営農班：国吉隼人氏

(4)調査概要

① 久米島町の脱炭素化に向けた取組状況（久米島町エネルギービジョン 2020）

○基準年度（2018 年度）の電力自給率は 4.9%、エネルギー自給率は 3.1%となっており、CO2 排出量は 49,276ton/年である。

○2035 年度において電力自給率 100%、エネルギー自給率 68.9%の挑戦的目標達成を目指しており、CO2 排出量は 12,263ton/年（削減率 68.9%）としている。

○エネルギービジョン 2020 の最終年度 2040 年度においては、エネルギー自給率も 100%を目指し、CO2 削減率 100%（カーボンフリー）を達成するとしている。

○電力の 100%自給率（再エネ化）は海洋温度差発電（洋上浮体が中心）70%、太陽光発電 30%を想定している。

② 宮古島再エネモデルの久米島への横展開の可能性

○考え方としては、興味あるモデルであり、今後の設備メニューの選択として考えられるが、本モデルは製糖会社、サトウキビ農家の協力なくしては達成できないとの意見。また、久米島町の再エネの導入優先事項として、バイオエタノールの優先度が低い。

○糖蜜の状況

久米島製糖からの糖蜜生産量は昨年実績 2,247ton、全量を伊藤忠製糖に飼料用とし販売している。

○サトウキビ夏植え端境期を活用してのスイートソルガム栽培については、製糖会社、サトウキビ農家の協力が必須であり、宮古島でのソルガム栽培実証結果などを参考に今後検討したい。

## 6.5. スイートソルガム活用に向けた今後の課題

本調査に於いて、スイートソルガムは離島における地産地消の再エネ電力確保のための資源作物として、有効であることが示されたが、本資源を活用してエタノールの商業生産を実現するためには、以下に示す事項が課題<sup>[26]</sup>として残されているとされており、今後の更なる検討が必要と考えられる。

### ① 栽培・収穫方法等の改善

- 大規模栽培に対応した農地確保及び効率的収集運搬方法
- 農家からの収穫物の引き取り条件の確立及び低廉な肥料の確保（高価な化成肥料の節約）等による原料作物コストの低減
- 強風に対する耐倒伏性がサトウキビに劣り、倒伏により生産性が低下する。このため、強風被害回避の方策（耐倒伏品種、強風シーズンを回避する2回収穫方式）の検討が必要。
- 省力・低コスト栽培方法の検討が必要。施肥量の削減、無除草栽培の可能性調査等

### ② 育種

- 現地の気候や土壌性状等に適した品種の育種・選定

### ③ 連作障害の防止

- 限られた土壌（酸性火山灰地）で連作障害発生の可能性があり、品種の改良や他の作物との輪作等が望まれる。

### ④ エタノール製造、農業、畜産を含めた循環型システムの構築

- スイートソルガムをエタノール原料として利用することのほかに、茎葉を緑肥・堆肥や家畜飼料として、利用することが可能であり、これらの利用方法を資源循環型の農業サイクルに組み込むことによって食料農畜産物の生産に寄与する可能性がある。
- 飼料・肥料を含めた総合的生産方法の確立についての検討

### ⑤ 副産物の有効活用

- バガス（搾汁残渣）の発電用燃料としての活用による収入源の拡大
- 発酵残渣等の副産物の高付加価値化等による収入源の拡大

## 7. まとめ

本調査では、地産でカーボンニュートラルな燃料として期待される粗留バイオエタノールを、すでに日立造船(株)殿で商品化済みの都市ガス用 SOFC に適用する場合の課題とその対策等について検討した。あわせて、バイオエタノール SOFC の低炭素化・地産地消型分散型電源としての実現可能性について調査した。

その結果、バイオエタノールを SOFC に適用する上で一つの大きな課題であった燃料に含まれる不純物について、有機不純物については特に問題にならない可能性が高いこと、触媒への悪影響が懸念される硫黄化合物やイオン化物については、イオン交換樹脂で除去できる可能性があることがわかった。一方、微量の無機元素と蒸発残分については、現時点では有効な除去方法がなく、蒸発器の構造や運転方法による対応についても検討が必要である。特に、蒸発残分については含まれる物質の特定が必要である。

また、改質器での炭素析出が検討課題の一つとされたが、プロセスシミュレーションの結果によれば、本装置の標準的な運転条件下では、粗留エタノールをそのまま供給する（改質水を添加しない、O/C=2.4）の場合であっても、改質器での炭素析出は確認されず、燃料供給系を簡略化できる可能性が高い。さらに、上記の条件で運転することができれば、既存の都市ガス機と比較して高いセル電圧（発電出力と同等）を得ることが可能で、燃料供給系や蒸発器系統も大きく変更せずに現行機を適用できる可能性の高いことがわかった。

以上のように、技術的観点からは、粗留エタノールの SOFC への適用に対する実現可能性は十分に高いと考えるが、実機に適用するにあたっては、改質試験および実証運転の実施によって、本調査結果を確認し、上述の課題を解決する必要がある。

一方、経済的な観点からは、発電コストに対する燃料価格の影響が大きく、現時点では、原燃料が低濃度エタノールであったとしても、粗留エタノール SOFC でグリッドパリティを達成することは容易ではない。しかしながら、地理的要因や昨今のエネルギー価格の上昇等を考慮すると、地産地消の再生可能エネルギーであるバイオエタノールの有効利用は、エネルギーの低炭素化のみならず、持続可能な循環型社会の構築、電源セキュリティの確保やレジリエンスへの対応など、価格面以外の導入メリットを考慮する必要があると考える。

更には、バイオマス資源をバイオエタノールの形でエネルギー利用していくことは、燃料電池のみならず、2050 年カーボンニュートラルに向けた水素の社会実装への道筋をつけていく上で非常に重要な取り組みとなり、また、図 7-1 に示す通り、離島での再生可能エネルギーへの取り組みを通じて、農業の食料生産機能と再エネ生産機能の融合により、農業の活性化、農業・工業・エネルギー産業が一体となった新たな産業の創出、雇用創出及び人材育成につながることを期待するものである。

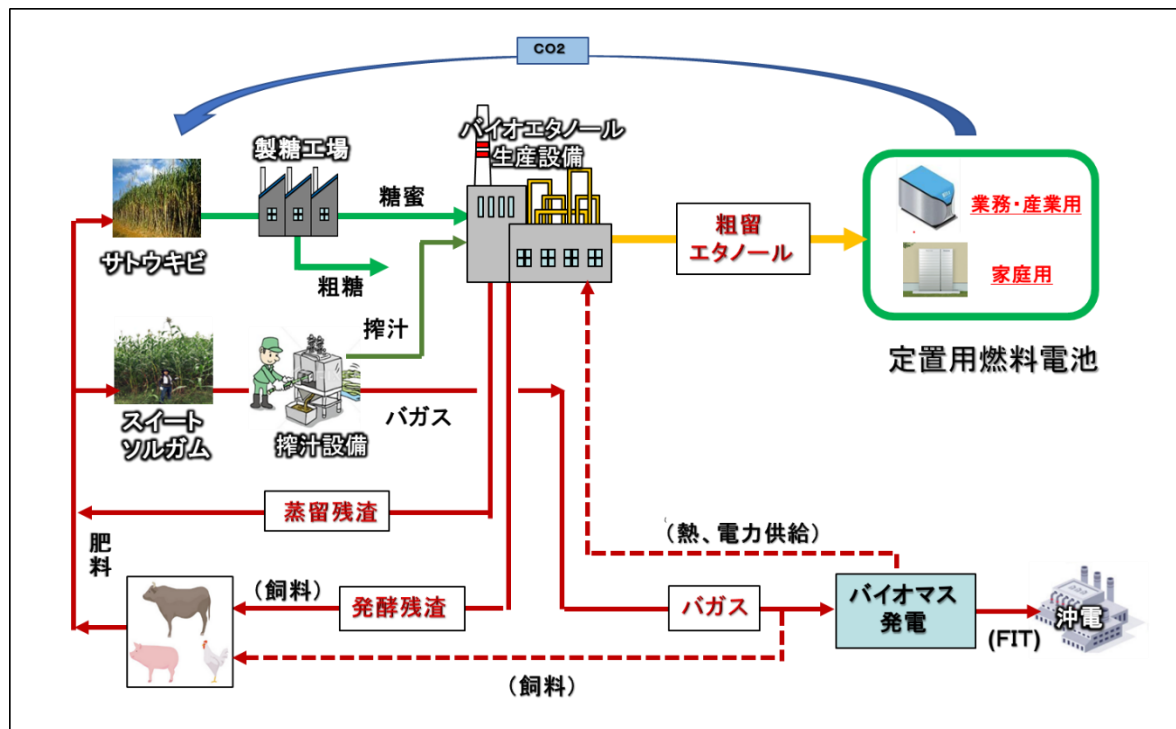


図 7-1 離島におけるグリーン電力導入による循環型社会モデル

最後に、本調査事業を進めるに当たって、豊富な燃料電池技術の知見を有し、2050 年脱炭素化社会に向け多方面で全社的な取り組みを推進されている日立造船株式会社殿に多大なご協力を頂きましたことに対し感謝いたします。

## 【参考文献・資料】

### 第1章

- [1] 例えば、沖縄県クリーンエネルギー・イニシアティブ ～2050 年度 脱炭素社会の実現に向けて～（2022 年 3 月改定）（沖縄県），  
<https://www.pref.okinawa.jp/site/shoko/seisaku/kiban/initiative/okinawacleanenergyinitiative.html> (Accessed 2023.2.21).
- [2] 例えば、宮古島市環境モデル都市行動計画（宮古島市），  
[https://www.city.miyakojima.lg.jp/gyosei/ecoisland/modeltoshi/files/miyakojima\\_kankyomodelcity\\_AP.pdf](https://www.city.miyakojima.lg.jp/gyosei/ecoisland/modeltoshi/files/miyakojima_kankyomodelcity_AP.pdf) (Accessed 2023.2.21).
- [3] 例えば、日本のエネルギー，  
[https://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/pdf/energy\\_in\\_japan2021.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/pdf/energy_in_japan2021.pdf) (Accessed 2022.12.12).
- [4] 例えば、需給情報（沖縄電力），  
[https://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/pdf/energy\\_in\\_japan2021.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/pdf/energy_in_japan2021.pdf) (Accessed 2022.12.12).
- [5] 日本規格協会, JIS K2109 : 2011, 燃料用エタノール.
- [6] 遠藤 真弘, 国産バイオエタノールの普及に向けて ―沖縄での取り組みを中心に―, 調査と情報, 553, pp.1-10(2006).
- [7] 岩崎 博, 山田興一, バイオエタノールプロセスの合理化, 日本エネルギー学会大会講演要旨集, 14(3-6), pp.108-109(2005).
- [8] 山本 正和, 相本 裕之, バイオエタノールの環境対策としての有効性に関する考察 ―CO<sub>2</sub>削減効果の評価―, 人間と環境, 30(3), pp.2-11(2011).

### 第2章

- [9] 宗野 祐一 他 4 名, エタノール水蒸気改質器の基礎研究, 日本機械学会 動力・エネルギーシンポジウム講演論文集, No.OS5-5, pp.263-268(2007).
- [10] 安藤 裕司, 松岡 浩一, 倉本 浩司, バイオエタノール改質による水素・メタン製造, 日本エネルギー学会大会講演要旨集, No.4-1-4, pp.144-145(2017).
- [11] 佐伯 貴紀, エタノール水蒸気改質による水素精製用触媒の開発および特性評価, 豊橋技術科学大学 機能材料工学専攻 博士論文(2015).

### 第3章

- [12] 佐々木 一成 他 3 名, 固体酸化物形燃料電池の科学的耐久性, Electrochemistry, 80-3, pp.150-154(2012).
- [13] 久保田 康幹, 黒田 健一, 秋山 幸司, バイオマスエネルギー利用の燃料電池の現状と展望, 富士技報, 75(5), pp.295-298(2002).
- [14] 紺野 博文, 灯油仕様燃料電池向け水素製造技術の開発, 水素エネルギーシステム, 33(1), pp.11-14(2008).

- [15] 石月 貴美香, SOFC 水素製造触媒の開発, ENEOS Technical Review, 55(2), pp.17-19(2013).
- [16] 龍井 洋 他 5 名, 燃料電池ユニットの欧州展開, パナソニック技報 60(2), pp.71-76(2014).
- [17] 岩崎 尚喜 他 5 名, バイオエタノールの脱硫 (第 1 報 Co-Mo 系触媒を用いた水添脱硫), 石油学会 年会・秋季大会講演要旨集, No.2A20(2009).
- [18] 岩崎 尚喜 他 5 名, バイオエタノールの脱硫 (第 2 報 活性炭担持貴金属触媒を用いた水添脱硫), 石油学会 年会・秋季大会講演要旨集, No.2E21(2010).
- [19] 山本 拓司, Chaichanawong, Jintawat, 大森 隆夫, バイオエタノール中の硫黄系不純物除去を目的とした金属担持多孔質カーボンの液相吸着特性, 化学工学会 研究発表講演要旨集, No.F203(2009).
- [20] 浅野 浩一 他 2 名, 平板型 SOFC 単セルの加圧運転と性能解析, 電力中央研究所報告, M14009 (2015).
- [21] EG&G Technical Services, Inc., FC Handbook 7th (2004).

#### 第 4 章

- [22] 一般財団法人 コージェネレーション・エネルギー高度利用センター (メーカー販売台数), 一般社団法人 燃料電池普及促進協会 (販売価格) のデータから, 資源エネルギー庁が作成, [https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/nenryodenchi\\_01.html](https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/nenryodenchi_01.html) (Accessed 2022.12.9).
- [23] NEDO 燃料電池・水素技術開発ロードマップ ー 定置用燃料電池技術開発ロードマップ (解説書) ー, <https://www.nedo.go.jp/content/100956713.pdf> (Accessed 2023.2.19).
- [24] 例えば, <https://www.okiden.co.jp/common/calculation/gyoumu/index.html> (Accessed 2023.2.20).
- [25] 例えば, <https://www.okiden.co.jp/corporation/price-menu/low-voltage/https://www.okiden.co.jp/common/calculation/gyoumu/index.html> (Accessed 2023.2.20).

#### 第 6 章

- [26] バイオエタノールの導入技術比較調査 成果報告書(2020), エネルギー総合工学研究所. アルコール協会スイートソルガム研究会報告書より