



## 新規水素発生菌によるバイオマスからの高効率/高速水素生産

### 開発代表者

横浜国立大学教育人間科学部 谷生重晴

### 起業家

日曹エンジニアリング(株) 小波 盛佳

## 開発推進体制



研究開発担当

業務開発担当

実験研究担当

【開発代表者】  
氏名: 谷生 重晴  
研究開発実施場所: 横浜国立大学  
(横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5  
横浜国立大学 教育人間科学部)

再委託契約

【起業家】  
氏名: 小波 盛佳  
研究開発実施場所:  
日曹エンジニアリング  
(千代田区神田神保町1-6-1  
新規事業開発グループ)

【分担開発者】  
氏名: 堂免 一成  
役割: 触媒改良  
研究開発実施場所: 東京大学  
(文京区本郷7-3-1 東京大学大学院)

【開発支援者】  
ポスドク 1名

【分担開発者】  
氏名: 石川 高広  
役割: プロセス開発  
研究開発実施場所: 日曹エンジニアリング  
(市原市五井南海岸47 技術研究所)

【分担開発者】  
氏名: 長谷川 幸教  
役割: 市場調査解析  
研究開発実施場所: アスカビーエフ (台東区)

【開発支援者】  
博士課程学生 3名  
実験補助員 1名

【分担開発者】  
氏名: 佐野 彰  
役割: 性能試験  
研究開発実施場所: 横浜国立大学  
(横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5  
横浜国立大学ベンチャービジネスラボラトリー)

外注契約  
日曹エンジニアリング(株)  
(千代田区神田神保町1-6-1)  
役割: 構造製作及び設備の設計施工

## 技術の新規性及び優位性



### 技術の新規性

- 従来の37℃前後の低温ではなく、また、70℃前後の高温でもない**50℃前後の中温**発酵で高速水素生産する菌を発見した。
- 発酵液を併設の触媒反応槽との間で循環させ、代謝産物同士を**直接反応**させて系から取り除くシステム。
- メタン発酵に比べて**数十分の1**の大きさの発酵槽で済む。(数時間：数日)

### 技術の優位性

- 他の水素発生菌に比べて極めて**高速で水素発生**する菌である。  
(回分培養で従来菌の**2~10倍**高速)
- **廃液処理**のためのメタン発酵を行わなくても良い(**1段の発酵で完結**)。
- 温度制御で代謝産物組成をシンプル化できる(**90%が酢酸とエタノール**)。
- 熱化学法(600~800℃)に比べて**80℃以下**の低い温度で生産が可能。
- 水素メタン二段発酵に比べて水素収率が**2倍**である。

## 研究開発計画



- 菌体濃度の**高密度化**(初年度) ⇒ 水素生産速度の高速化  
菌体の**固定化材料の探索**により連続発酵における高密度培養技術を確立する。  
現状の**4倍の密度**で**10m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>・h**を目標。(申請書7頁の10m<sup>3</sup>/hは間違い)
- 発酵**廃液の減量化**(初年度~次年度)  
発酵液濃度を**現状の2倍以上**に高め使用水量を減らす。(酵素の利用など、小型化)  
固体酸触媒を活用して**発酵過程**で代謝産物の**エステル化技術**を開発。
- 副生成物の分離捕集(初年度~最終年度) ⇒ **発酵の促進**と**廃液の減量化**  
エステルの**発酵過程**での効果的**蒸留分離装置**を開発。
- セルロースの利用(初年度~最終年度) ⇒ 幅広いバイオマスの利用  
セルロース系バイオマスを利用できる**微生物の探索**  
セルロース糖化のための**スラリー処理装置**の開発
- 効率的な制御システムの開発(初年度~最終年度) ⇒ 生産速度の向上  
デンプン、セルロースの**糖化技術**を確立して生産速度を向上する。  
前処理、蒸留分離などを組み合わせた**プラントの制御システム**を開発する。

## 経費投入計画



7-1. 経費投入計画 (各費目についてお書きください)				(千円)
費目	平成19年度	平成20年度	平成21年度	合計
<b>①設備備品費</b>	29,000	22,000	22,000	73,000
・発酵ベンチ設備1設計・製造・工事費 (テストシステム、開袋/粉碎装置など)	24,000			
・発酵ベンチ設備2設計・製造・工事費 (10L発酵装置、改良開袋/粉碎装置など)		22,000		
・発酵ベンチ設備3設計・製造・工事費 (残渣処理装置、改良触媒反応装置など)			22,000	
・液体クロマトグラフィー 一式	5,000			
<b>②消耗品費</b>	5,300	6,300	5,300	16,900
・試薬類 一式	2,300	3,300	2,300	
・ガラス器具類 一式	1,000	1,000	1,000	
・設備改修部品 一式	2,000	2,000	2,000	
<b>③旅費・交通費</b>	5,500	6,000	5,000	16,500
・水素発酵菌及び高セルラーゼ生成菌の探索	3,000	2,500	2,500	
・海外情報収集	1,000	2,000	1,000	
・その他国内調査	1,500	1,500	1,500	
<b>④人件費・謝金</b>	8,000	14,000	16,000	38,000
・起業家	0	1,000	5,000	
・開発支援者(実験補助)	4,500	4,500	2,500	
・開発支援者1名	3,500	3,500	3,500	
・博士研究員		5,000	5,000	
<b>⑤委託費</b>	1,500	1,000	1,000	3,500
・特許・市場調査	1,500	1,000	1,000	
<b>⑥その他</b>	700	700	700	2,100
・書籍・資料	500	500	500	
・通信・運搬費	200	200	200	
<b>合計</b>	<b>50,000</b>	<b>50,000</b>	<b>50,000</b>	<b>150,000</b>

5

## 代表的な水素発生菌との性能比較



Category	doubling [ h ]	H <sub>2</sub> evolution rate [ mmol/(L·h) ] [ mmol/(g·h) ]	
<b>A. Photochemical evolution</b>			
1. Oxygenic photosynthetic organisms	7 ~ 25		
<i>Oscillatoria</i> sp. Miami BG7		0.4	0.4
<i>Anabaena cylindrica</i>	25	1.2	1.3
2. Anoxygenic photosynthetic organisms	2.2 ~ 9		
<i>Rhodospseudomonas capsulata</i>		5.3	5.3
<i>Rhodospirillum rubrum</i>		3.0	2.5
<i>Rhodobacter sphaeroides</i> 8703		-	10.4
<b>B. Fermentative evolution</b>			
1. Strict anaerobe	0.16 ~ 2		
<i>Clostridium butyricum</i>		-	15 ~ 20
<i>Clostridium beijerinckii</i> AM21B		17	25
<b>Newly isolated bacterium HN001</b>		<b>160</b>	<b>44</b>
2. Facultative anaerobe			
<i>Citrobacter intermedius</i>		11	9.5
<i>Enterobacter aerogenes</i> E.82005	0.25	36	17

Tanisho et al., Int. J. Hydrogen Energy, 12, pp.623-627 (1987)


IPHE (International Partnership for the Hydrogen Economy)で発表  
特許取得菌の性能と代表的な水素発酵菌の一覧




	培養法 <sup>*1)</sup>	温度 [°C]	基質	収率 <sup>*2)</sup> [mol/mol]	発生速度		著者
					[mmol/L·h]	[mmol/g·h]	
<b>絶対嫌気性細菌</b>							
<i>Clostridium</i> sp. No 2	B	36	glucose	2	24	—	1994 Taguchi et al. <sup>2)</sup>
<i>C. paraputrificum</i> M-21	B	37	GlcNAc	2.5	31	—	2000 Evvvernie et al. <sup>3)</sup>
Mesophilic bacterium HNO01	B	47	glucose	2.4	147	44	2006 Tanisho et al. <sup>4)</sup>
<i>C. butyricum</i> LMG1213tl	C	36	glucose	1.5	22	—	1986 Heindrichx et al. <sup>5)</sup>
<i>Clostridium</i> sp. No 2	C	36	glucose	2.4	21	—	1990 Taguchi et al. <sup>6)</sup>
<b>通性嫌気性細菌</b>							
<i>Enterobacter aerogenes</i> E.82005	B	38	glucose	1	21	17	1987 Tanisho et al. <sup>8)</sup>
<i>E. cloacae</i> IIT-BT 08	B	36	sucrose	3	35	29	2000 Kumar et al. <sup>9)</sup>
<i>E. aerogenes</i> E.2005	C	38	molasses	0.7	36	17	1993 Tanisho et al. <sup>10)</sup>
<i>E. aerogenes</i> HU-101 m AY-2	C	37	glucose	1.1	58	—	1998 Rachman et al. <sup>11)</sup>
<b>高温細菌</b>							
<i>Thermotoga maritima</i>	B	80	glucose	4	10	—	1994 Schröder et al. <sup>12)</sup>
<i>Thermotoga elfii</i>	B	65	glucose	3.3	3	5	2002 van Niel et al. <sup>13)</sup>
<i>Caldicellulosiruptor</i> <i>saccharolyticus</i>	B	70	sucrose	3.3	8	12	ibid. <sup>13)</sup>
<i>Clostridium thermocellum</i>	B	60	cellobiose	1	7	14	2006 Islam et al. <sup>14)</sup>
<i>Thermococcus</i> <i>kodakaraensis</i> KOD1	C	85	pyruvate	2.2	9	59	2004 Kanai et al. <sup>15)</sup>

同じ菌でも連続培養すると菌体濃度が濃くなるので  
水素発生速度は速くなる。

発生速度比較ビデオ

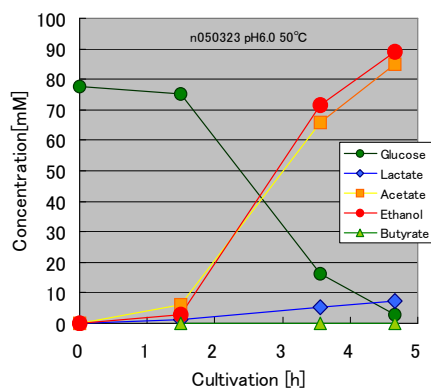
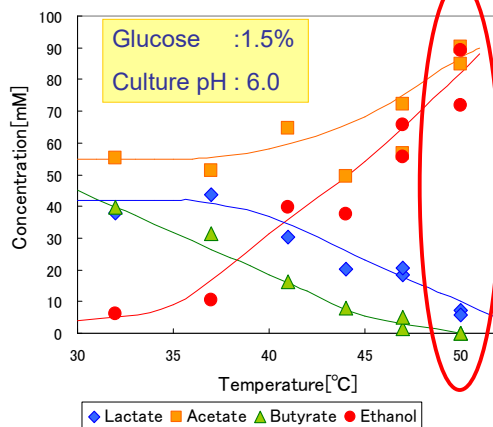


特許取得菌と代表的な水素発酵菌  
の発生速度比較 

# *Enterobacter aerogenes*

Free cultivation

## 培養温度による代謝産物の変化

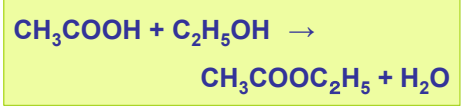
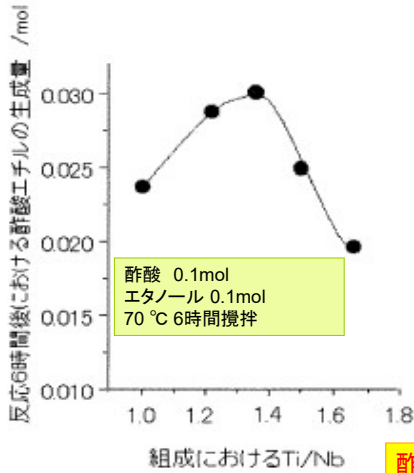


50 °Cではほぼ酢酸とエタノールだけを等量代謝生産する  
酢酸エチルとして分離回収すれば、商品化と共に廃液量を減量出来る

# Ti-Nb固体酸触媒によるエステル化反応



【図 3】



温度	T	70	C
自由エネルギー	$\Delta G$	-6.393	kJ/mol
平衡定数=	K	9.400	

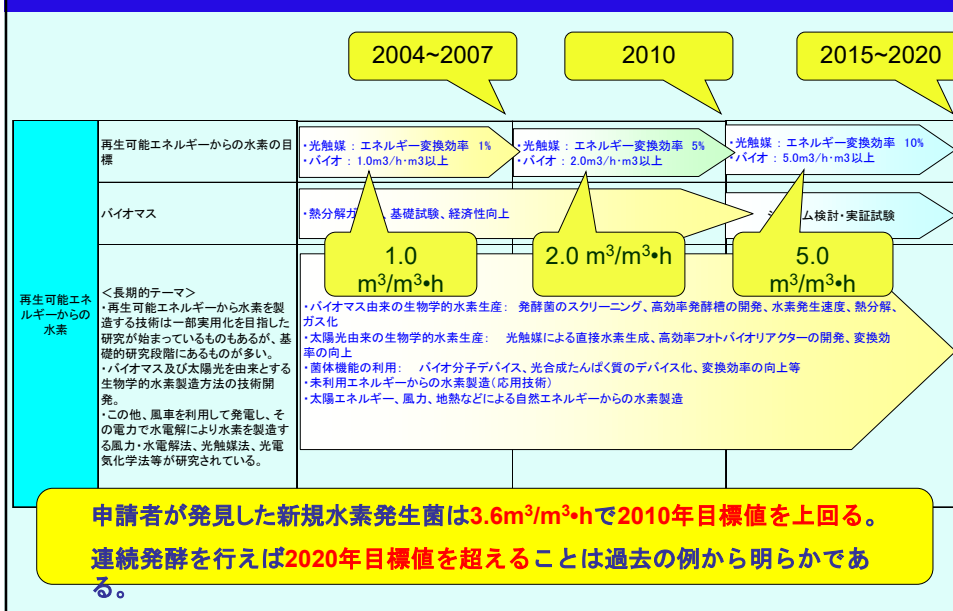
	沸点 [C]
酢酸	117.8
エタノール	78.3
酢酸エチル	76.8

酢酸エチルの方がエタノールより沸点が低い！！

酢酸エチルの水への溶解度は小さい！

# 再生可能エネルギーからの水素生産ロードマップ

エネルギー総合工学研究所



申請者が発見した新規水素発生菌は3.6m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>・hで2010年目標値を上回る。連続発酵を行えば2020年目標値を超えることは過去の例から明らかである。

## 新規スクリーニング株の一部



List of newly isolated strain

Sample name	Culture [L]	pH [-]	Temp. [°C]	Feed Conc. [%]	H <sub>2</sub> Prod. [L/L]	Max rate [L L <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> ]	Yield [mol-H <sub>2</sub> /mol]
HN001	0.35	6.00	47	2.0	6.23	3.61	2.18
HN001	0.35	6.00	47	1.5	4.90	3.34	2.25
MZ9-2	0.7	6.00	48	2.0	2.93	2.93	2.59
HH06-2-2	0.7	6.00	48	1.5	2.92	2.92	2.13
HH01-4	0.7	6.00	48	1.5	2.9	2.9	2.4
3F-3-2	0.7	6.00	48	1.5	2.6	2.6	2.5
3F-3-1	0.7	6.00	48	1.5	2.6	2.6	2.8
ON2-1-3	0.7	6.00	48	1.5	3.83	2.36	1.84
HH06-2	0.5	6.00	49	1.5	5.49	2.22	2.40
HH01-2	0.7	6.00	48	1.5	5.02	1.98	2.48
ON2-3	0.6	6.00	49	1.5	4.79	1.96	2.24
HH01-1-2	0.7	6.00	48	1.5	4.06	1.93	1.96
HH06-2-1	0.7	6.00	48	1.5	4.47	1.91	2.18
MZ11-1	0.7	6.00	48	1.5	4.72	1.75	2.32
ON2-1	0.6	6.00	49	1.5	4.80	1.65	2.24
HO10-1-3	0.7	6.00	48	1.5	4.85	1.51	2.38
HH01-1	0.5	6.00	49	1.5	4.95	1.49	2.15

Glucose 2.0%のとき  
3.6 L/L・h

発生速度 2.9 L/L・h  
水素収率 2.6

## 水素需要市場環境と事業構想

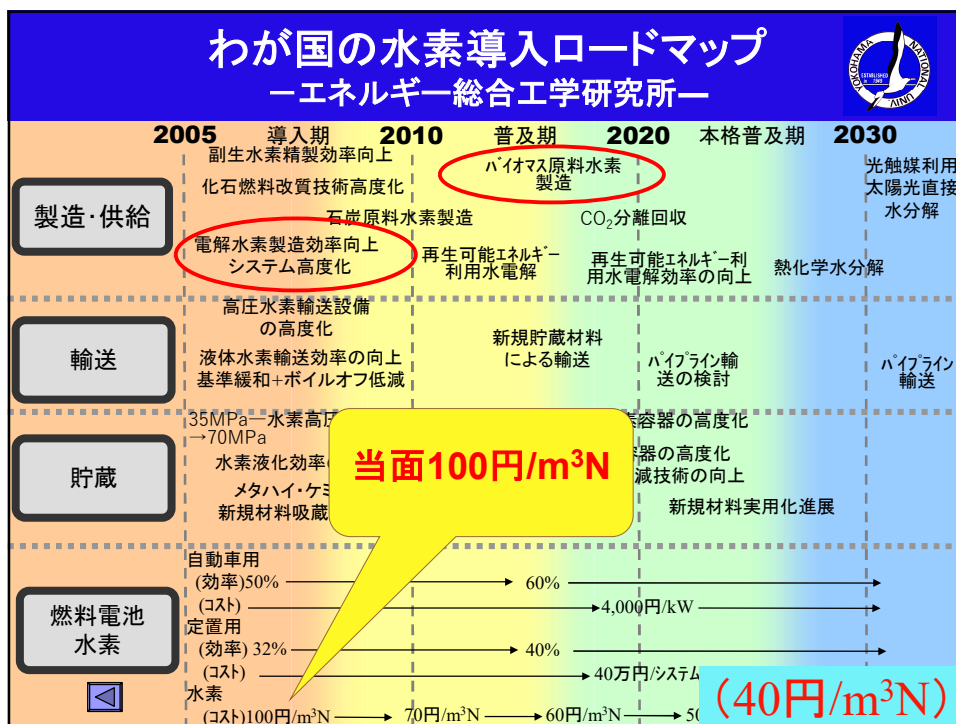
平成22年(2010年)における市場環境



### 温暖化防止のために！

- 日本の水素エネルギーロードマップ  
(2010年燃料電池車5万台走行推定：実状からは2000台程度か)  
(定地用燃料電池は2007年で既に2000台以上が全国でテスト運転中)
- アメリカDOE Hydrogen Roadmap  
(2025年燃料電池車600万台走行計画：日本に負けない計画を進行中)
- カナダBritish Columbia州 水素ハイウェイ計画  
(2010年冬季オリンピック完成に向けて工事中：燃料電池バス20台走行計画)
- ノールウェー 水素ハイウェイ計画  
(バイオマス由来水素のフィリングステーション設置計画)
- ベルリン 水素バス運行  
(水素エンジンバスの市内運行計画：市内走行実施中)
- 三重県水素エネルギー総合戦略会議(燃料電池実証試験など)
- 青森県環境・エネルギー産業創造特区(八戸市、十和田市、三沢市、むつ市、他十町村)
- 釜石市 クリーンエネルギー導入計画  
(クリーン自動車100台走行計画：地域振興とバイオマス利用による温暖化防止)

たが多数のプロジェクト計画が進行中。バイオマス需要は確実に拡大する！



## 事業構想

### 製品化目標

- 水素ガス: 現状で  $1 \text{ m}^3\text{-H}_2 = 1 \text{ L-gasoline}$  の価値を持つ
- 水素発酵システムとして製品化: 原料投入から気液固分離までのトータルシステム
- 代謝副産物の商品化: 酢酸エチルの価値は高い(130~140円/kg, 2005)
- 高品質液肥として商品化: 廃液の有効活用、メタン発酵と比べ硝酸体窒素が無い
- コンサルティングも業務に: 水素発酵のノウハウをアドバイス
- プラント建設とメンテナンス: メンテナンスを引き受けることで収入を安定化

### ターゲット市場

- 食品産業を目標: 事業所あたりの排出量が多く、食品廃棄物法による処理義務を負う。廃棄物がエネルギーになり、比較的均質で綺麗な原料が得られ安定操業が可能
- 自治体: 多くの自治体が環境問題には積極的。宣伝効果と地場産業の活性化
- 小規模レストラン、ベーカリー、デパート: 環境に関心を持つ事業者を対象
- 燃料電池発電システム取り扱い事業者: 燃料電池の販売対象を広げる効果を期待



## 起業までの業務計画



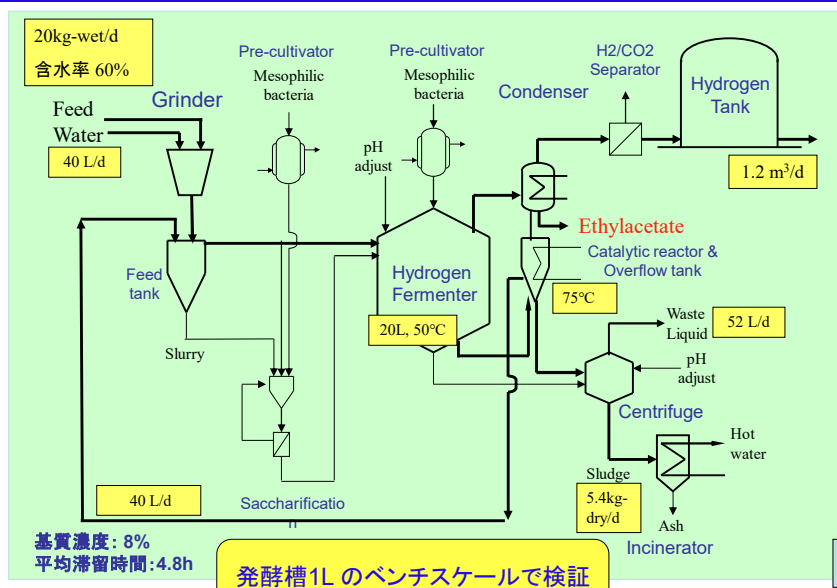
- ・ 実証用中規模プラントの設計と性能確認（最終年度）：  
原料1トン/日の実証テストプラントを設計（建設）し、性能、コストを検証。
- ・ 商用（大型）プラントの経済性確認：  
100トン/日規模のプラントの試算を行い、コストを把握。
- ・ 権利化の促進：  
開袋/粉碎装置、スラリー化処理技術、触媒反応装置などを  
企業と連携して開発し特許出願する。  
さらに高度な性能を示す菌を発見して権利化する。
- ・ 技術の広報活動：学会発表、自治体等への働きかけ  
他の方法（エタノール発酵、メタン発酵、熱化学法など）に比べて  
エネルギー効率、コストパフォーマンスに優れていることをPR。
- ・ 事業戦略の策定：  
水素需要、販売方法などの市場動向及びユーザー調査を実施する。  
想定ユーザーとの共同開発提案を行い、市場形成のための活動を行う。  
既に開始または、今後開始される予定のステーション計画に参画し、  
共同で進める土台を作る。



## 某社の 水素発酵実験装置



## 改良高効率連続発酵プロセスフローチャート



## 沖縄県をモデルにした経済性試算 (バブコック日立の概算を参考)



### ● 廃糖蜜 3,500 ton/年・工場

収率 1 のケース・・・130,000m<sup>3</sup>の水素生産/年・工場  
 収率 2 のケース・・・260,000m<sup>3</sup>の水素生産/年・工場  
 収率 3 のケース・・・490,000m<sup>3</sup>の水素生産/年・工場

### ● 水素販売収入 (水素価格80円/m<sup>3</sup>とする)

収率 1 のケース・・・1010万円/年・工場  
 収率 2 のケース・・・2020万円/年・工場  
 収率 3 のケース・・・3030万円/年・工場

現状の廃糖蜜販売価格 1,500円/ton  
 収入 525万円/年・工場

### ● プラント建設コスト 6,000万円とすると

収率 1 のケース・・・5年で償却 (不可)  
 収率 2 のケース・・・3年で償却 (可?)  
 収率 3 のケース・・・2年で償却 (可)

### ● ランニングコスト

蒸気 (低温熱源) ..... 0円/年  
 NaOH (pH調節用) ..... 5万円/年  
 汚泥引取 (有効活用考慮) ..... 0円/年

人件費 ..... 600万円/年  
 定検費用 ..... 50万円/年  
 合計 655万円/年

### ● 建設費回収後の工場の利益 (収率2.5)

水素売価80円/m<sup>3</sup>と仮定: 1945万円/年・工場  
 水素売価50円/m<sup>3</sup>と仮定: 970万円/年・工場

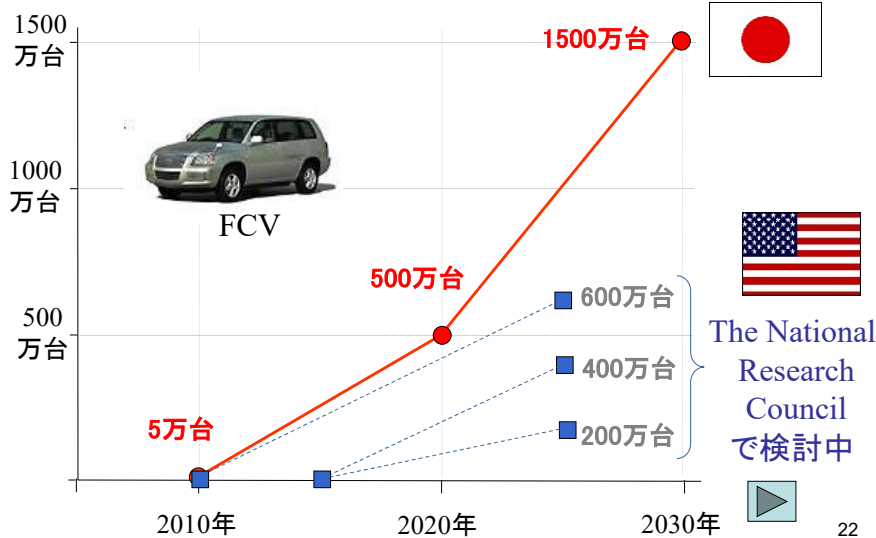
### 目標

将来の水素価格低落への対応の為

- ① 収率のアップ (3以上)
  - ② シンプル・低コストな  
プラントの設計・製作
- (プラント建設コスト3,000万円)

## 日本とアメリカの燃料電池自動車普及シナリオ

資源エネルギー庁とDOEのロードマップから



## 食品製造残さの発生量



食品製造副産物発生量			
区分	事業所数	発生量 (千トン)	事業所当り (トン)
畜産食料品	96	86.6	902
水産食料品	65	26.5	408
農産加工	25	41.7	1,668
調味料	69	39.7	575
糖類	11	263.6	23,964
精穀・製粉	26	119.2	4,585
パン・菓子	106	24.0	226
動植物油脂	11	59.9	5,445
その他の食料品	168	135.0	804
清涼飲料	46	120.9	2,628
酒類	90	302.9	3,366
茶・コーヒー	25	3.4	136
<b>主要製品計</b>	<b>738</b>	<b>1,223.4</b>	<b>1,658</b>

これらを取敢えずのターゲットとする



「食品製造業に於ける食品製造残さの飼料化に関する状況調査」(社団法人食品需給研究センターと社団法人配合飼料供給安定機構の共同調査、H16年9月)

23

## バイオエタノールとバイオ水素の比較

エネルギー効率、酢酸エチルの価値



### エネルギーの利用効率の試算

	生産効率	加工損失	使用効率	総合効率
発酵水素	0.25	0.1 (圧縮)	0.6 (燃料電池)	0.135
発酵エタノール	0.9	0.5 (蒸留)	0.2 (内燃機関)	0.09

水素収率が4(生産効率0.4)の菌を選別すれば、  
**総合効率は21.6%まで上昇する！！**

\*近未来における見込みとして、新微生物の発見により、発酵時の生成効率が0.4に上がる可能性は高い。それには、これまで谷生研究室が培ってきたノウハウが大きくものをいうと考えられる。それによって、発酵水素推進の流れを加速し、不動のものにできると考えている。

### 副生物「酢酸エチル」の市場

用途：塗料、印刷インキ、接着剤の溶剤または原料など

価格：塗料用途で130-140円/kg

年間取扱量：輸出されている量だけでも3千万トン。



24

# カナダのHydrogen Highway 計画



Hydrogen Highway

British Columbia

H2 & FC 2007 Int. Conf. 2007/5/2

## The BC Hydrogen Highway™ : Moving in the Right Direction

Alison Setton  
Hydrogen & Fuel Cells Canada  
May 2, 2007

### The Road to Commercialization

- Coordinated demonstration, deployment and market development program
- Framed to take advantage of the 2010 Winter Games 'spotlight'
- Seven highly visible locations
- Multi-agency effort
  - Lead by Natural Resources Canada

Vancouver airport

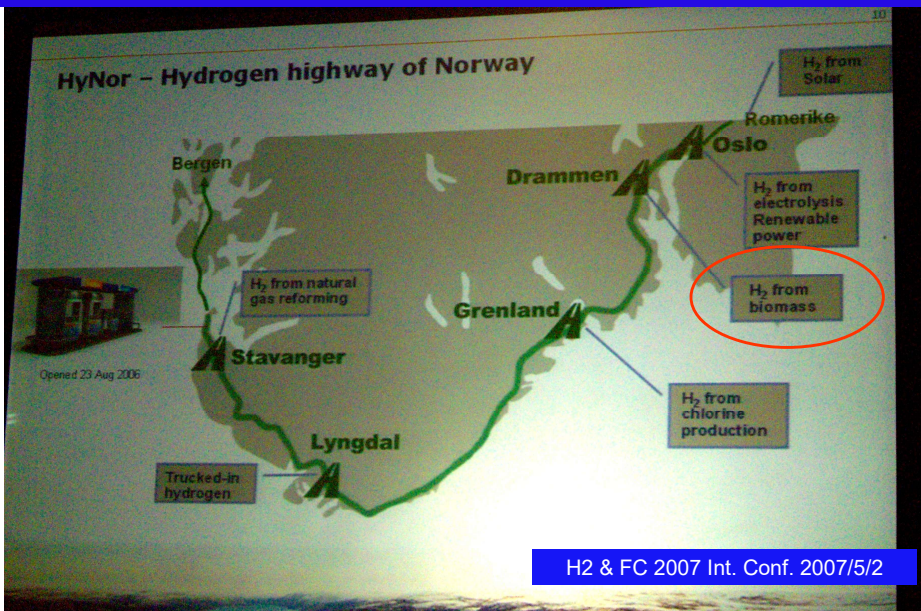
Whistler



Natural Resources Canada / Ressources naturelles Canada

# ノルウェーのHydrogen Highway計画

## HyNor – Hydrogen highway of Norway



H2 & FC 2007 Int. Conf. 2007/5/2

# ベルリン市街を走る水素自動車 2007/5/8



## 釜石市のクリーンエネルギー自動車導入計画



「めくみから まちの未来を創る エネルギー」  
を基本理念とし、新エネルギーの導入を進めます。

### 新エネルギーの導入効果

導入プロジェクト		導入可能性	CO <sub>2</sub> 削減効果 (kg-CO <sub>2</sub> /年)	省エネ効果 (原油換算 <i>kl</i> /年)	
太陽光発電	統合小学校	30kW	◎	7,888	6
	統合中学校	30kW	◎	7,888	6
	新魚市場 <sup>(注1)</sup>	112.5kW	◎	27,133	20
	新市庁舎	30kW	◎	7,888	6
風力発電	和山牧場(大規模)	45,000kW	◎	36,571,500	21,965
	和山牧場(2,000kW未満) <sup>(注2)</sup>	1,920kW	○	1,215,000	730
	楳ノ木平牧場 <sup>(注2)</sup> (2,000kW未満)	1,800kW	○	1,386,558	833
廃棄物発電	釜石市エコタウン事業	10,000kW	◎	909,273	14,011
コージェネレーション	病院	250kW	◎	13,636	267
クリーンエネルギー自動車		100台	◎	10,617	33
合計		-	40,157,381	37,877	

導入可能性：◎：現時点で導入の可能性が高い。 ○：現時点で導入が有望である。  
 (注1) 新魚市場は100kW太陽光発電と12.5kW風力発電のハイブリッド。  
 (注2) 和山牧場(2,000kW未満)と楳の木平牧場(2,000kW)について、風力発電規模については前者が大きいものの、風車1基当たりの規模は後者が大きく、発電効率も後者のほうが高いため、CO<sub>2</sub>削減効果は後者のほうが大きくなる。

# 神奈川県三浦市の魚加工残さ利用



2006年(平成18年)9月28日(木曜日)



## 魚や野菜 無駄なく肥料・燃料に

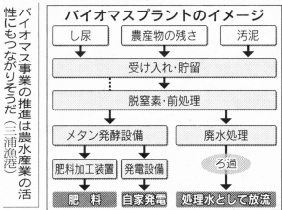
### 三浦にバイオマス施設

### 10年稼働目指す 地域資源ユーズ

神奈川県三浦市の第三セクター、三浦地域資源ユーズ(杉浦久社長)は、二〇〇八年にバイオマス(生物資源)プラントを新設する。魚や野菜の加工残さや家庭から出るし尿、浄化槽汚泥を肥料や電力などに加工する設備を整える。新エネルギー分野の研究を進めると同時に、資源循環型の街づくりを促し、地域経済活性化を目指す。

新プラントの名称は「バイオマスセンター」(バイオマスセンター)を軸に検討中。バイオマスは、化石燃料以外の生物資源を効率的に生かすことで、施工業者は「公開募集」して選ぶ。(吉田茂常務) 方針だ。

プラントは最新のメタンガス発酵設備や脱硫酸装置、肥料加工装置などで構成。受け入れる農産物残さやし尿、下水汚泥を電力や肥料などに再処理する。昨年実施した試算によると、一日当たり三・四トンの肥料と、四千六百六十六キロワットの電力を作り出すことが出来たという。発生する電力は



バイオマス事業の推進は農水産物の活性化にもつながりそうだ(三浦市長)

# 釜石エコタウンのコンセプト



かまいしエコタウン



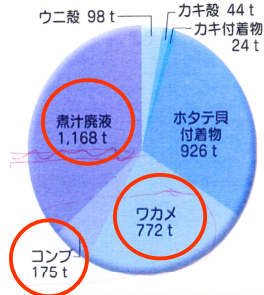
水産加工廃棄物(原料)



地域から発生する水産加工廃棄物を収集

協同組合マリンテック釜石

主な海洋系廃棄物



ワカメボイル加工の現場

17漁村集落からの海藻類廃棄物等は年間約2,000トン(うち270トンが海洋給餌)にもぼり、さらに煮汁廃液が約1,200トン発生していると推測されます。