

PROGRESOS RECIENTES EN LA SEGURIDAD Y ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO

Dr. Carlos Fúnez Guerra

**Responsable de la Unidad de Innovación Abierta
del Centro Nacional del Hidrógeno.**

carlos.funez@cnh2.es

*Centro Nacional del Hidrógeno, Prolongación Fernando el
Santo s/n, 13500, Puertollano, España.*

AGENDA.

1. EL HIDRÓGENO. FUNDAMENTOS.
2. HIDRÓGENO. SEGURIDAD.
3. USO DEL HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE .
4. USO INDUSTRIAL DEL HIDRÓGENO.
5. CONCLUSIONES.

1. EL HIDRÓGENO. FUNDAMENTOS.

1.



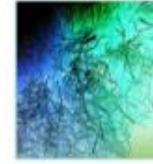
Es el elemento más abundante del Universo, pero no se encuentra libre en la Tierra.

No es un recurso natural, el hidrógeno hay que producirlo



2.

El hidrógeno puede producirse a partir de muy variados recursos (agua, recursos fósiles, biomasa, microorganismos, ...),...



... siguiendo diversos procesos de transformación (electrólisis, gasificación, reformado, fotoelectrólisis, fotobiólisis, ...)

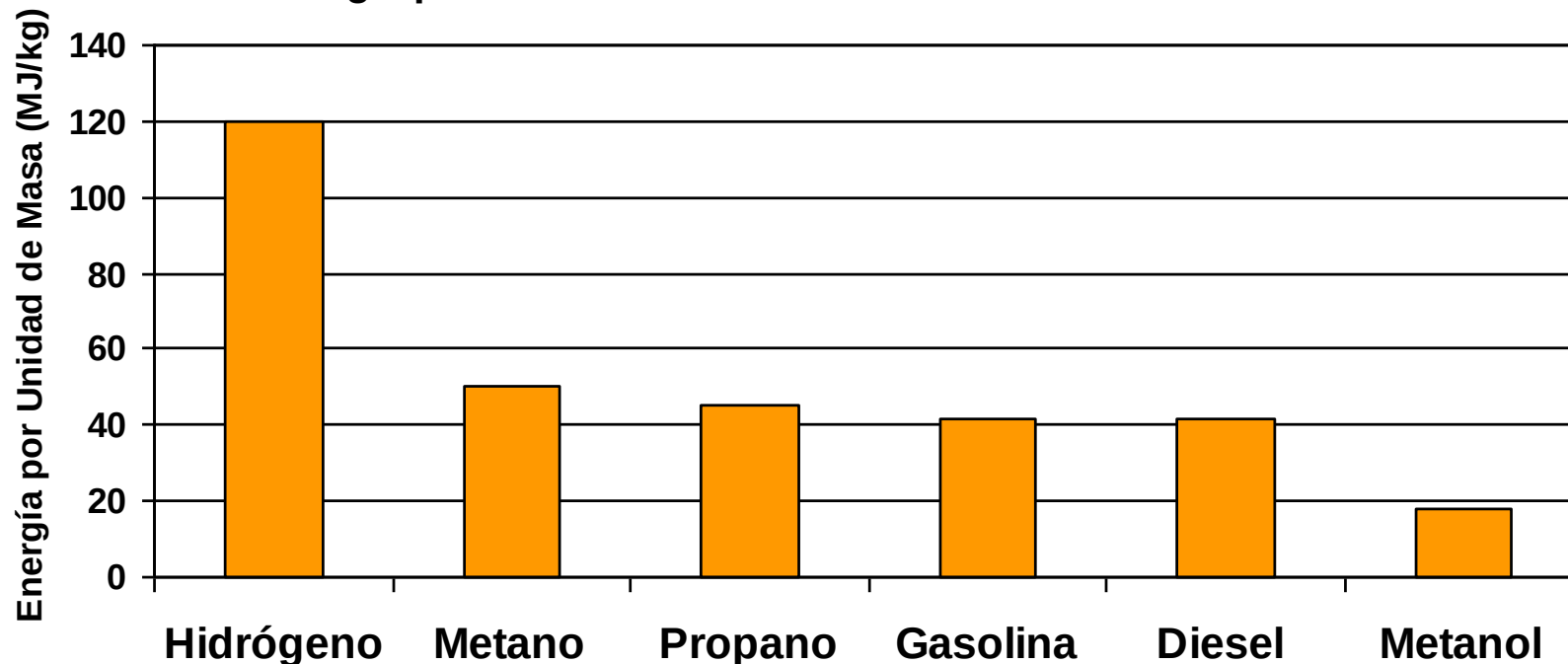
Por la diversidad de recursos, la utilización del vector H_2 implica mayor seguridad de abastecimiento energético y mayor acceso a la energía.

Todos los procesos de transformación suponen un gasto energético, cuyos costes son asumibles (al igual que sucede con la electricidad), pero a diferencia de la electricidad, el hidrógeno es almacenable

Fuente: AEH₂.

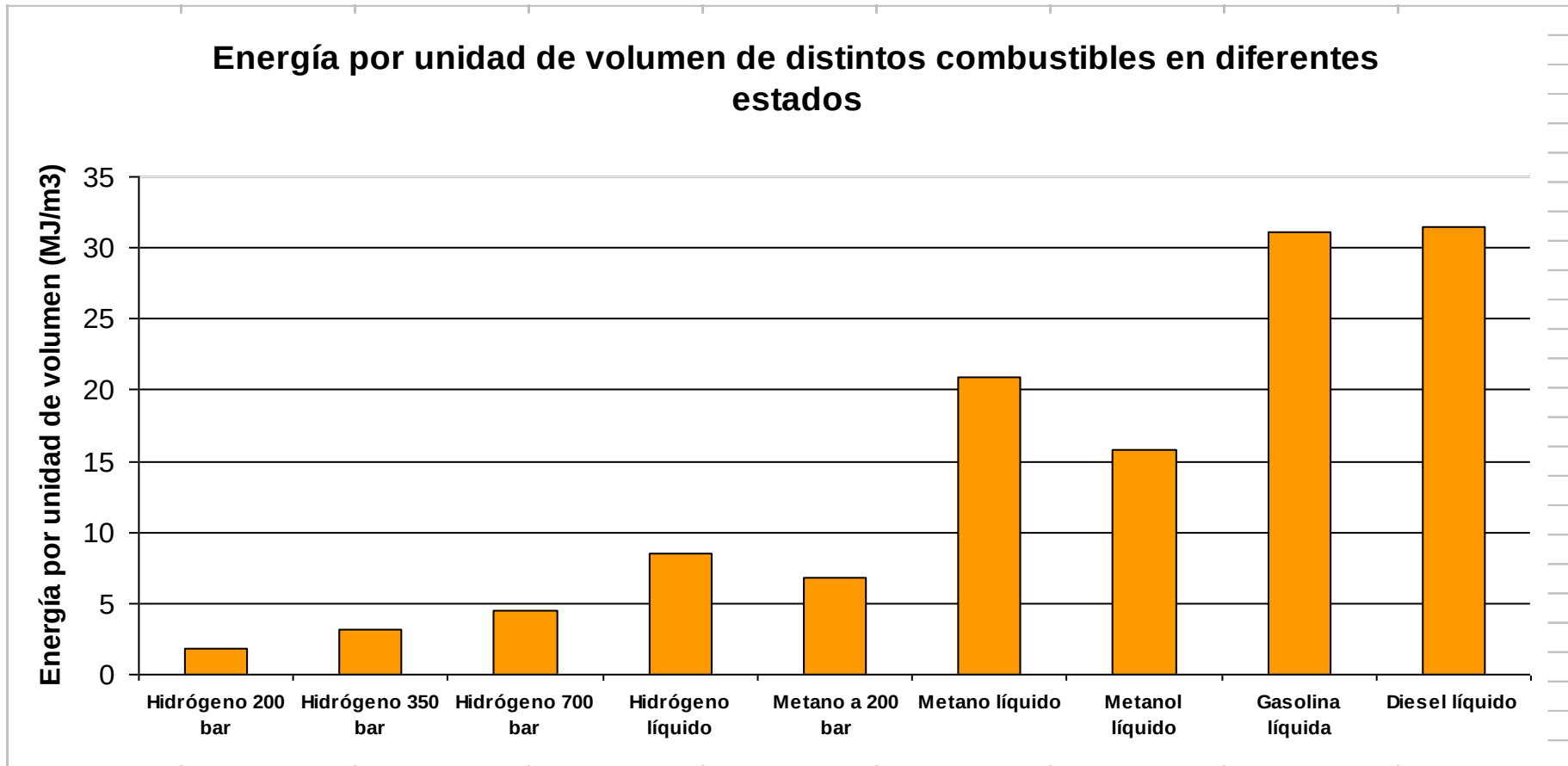
1. EL HIDRÓGENO. FUNDAMENTOS.

Energía por unidad de masa de diferentes combustibles



Hidrógeno	Metano	Propano	Gasolina	Diesel	Metanol
1 kg	2,40 kg	2,59 kg	2,78 kg	2,80 kg	6,09 kg

1. EL HIDRÓGENO. FUNDAMENTOS.



1. EL HIDRÓGENO. FUNDAMENTOS.

3. El almacenamiento, transporte y distribución de hidrógeno no presenta dificultades técnicas (comprimido, licuado, hidruros metálicos, compuestos químicos intermedios,...), pero **es caro**.



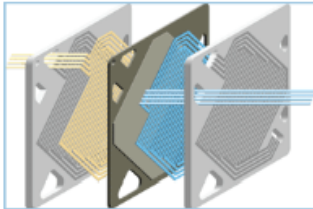
4. Para su utilización el hidrógeno puede combinarse con el oxígeno por procesos térmicos o electroquímicos para generar energía mecánica o eléctrica con una **emisión solo de vapor de agua**.

En su uso final el hidrógeno es intrínsecamente limpio y si se tiene en cuenta toda la cadena desde su producción al uso final, el hidrógeno como vector ofrece reducciones de emisiones de GEI.

Fuente: AEH₂.

1. EL HIDRÓGENO. FUNDAMENTOS.

1.



Una pila de combustible es un dispositivo electroquímico que **convierte directamente** la energía química en energía eléctrica (sin transformación intermedia a energía térmica y mecánica).

2.

Las pilas de combustible presentan más eficiencia que los motores de combustión interna (no están sometidas al límite del ciclo de Carnot).



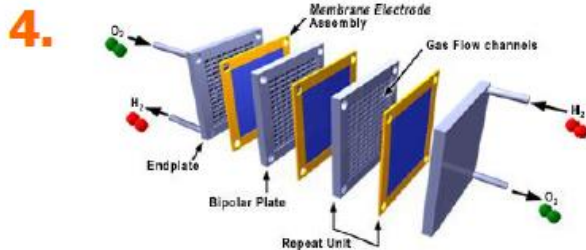
3.

Existen diferentes tecnologías de pilas de combustible que permiten su uso en distintas aplicaciones (transporte, generación estacionaria, telecomunicaciones, aplicaciones portátiles, etc.) y con variados rangos de potencia (desde vatios a megavatios).

Tecnología	T (°C)	Rend. (%)	Aplicaciones
Alcalina (AFC)	80-100	60	Espacio, Submarinos
Polímeros (PEMFC)	70-80	35-45	Transporte, Portátil, Estacionario baja potencia
Metanol Directo (DMFC)	50-100	30-40	Portátil
Ácido Fosfórico (PAFC)	200-220	40-45	Estacionario media potencia
Carbonatos Fundidos (MCFC)	600-650	45-60	Estacionario alta potencia
Oxido sólidos (SOFC)	800-1000	50-65	Transporte, Estacionario

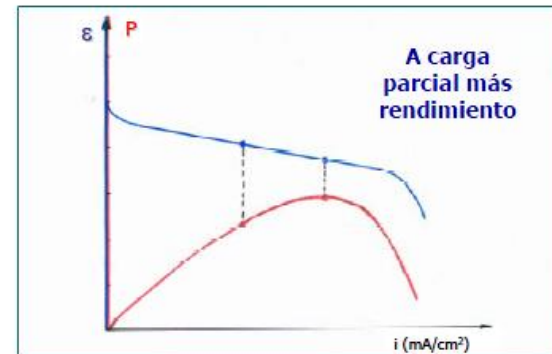
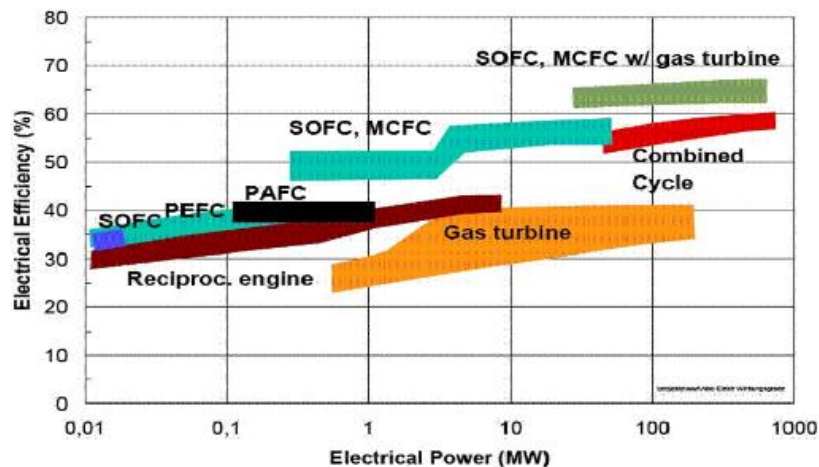
Fuente: AEH₂.

1. EL HIDRÓGENO. FUNDAMENTOS.



Tienen **carácter modular**, el número de celdas del "stack" determina la tensión total y el área de las celdas determina la intensidad de corriente.

5. A diferencia de los motores de combustión interna, las pilas de combustible presentan **más eficiencia a carga parcial**,...

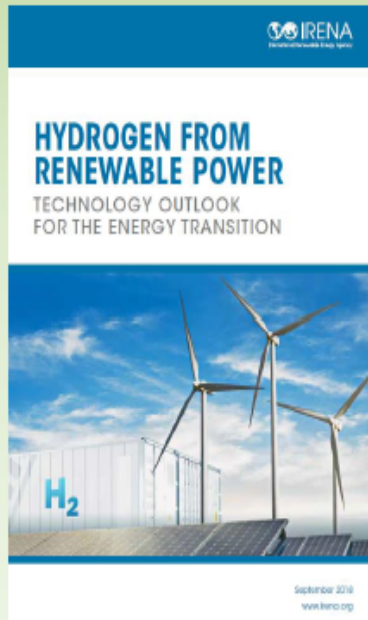


... y, además, a diferencia de las turbinas de gas, **mantienen la eficiencia con potencia bajas**.

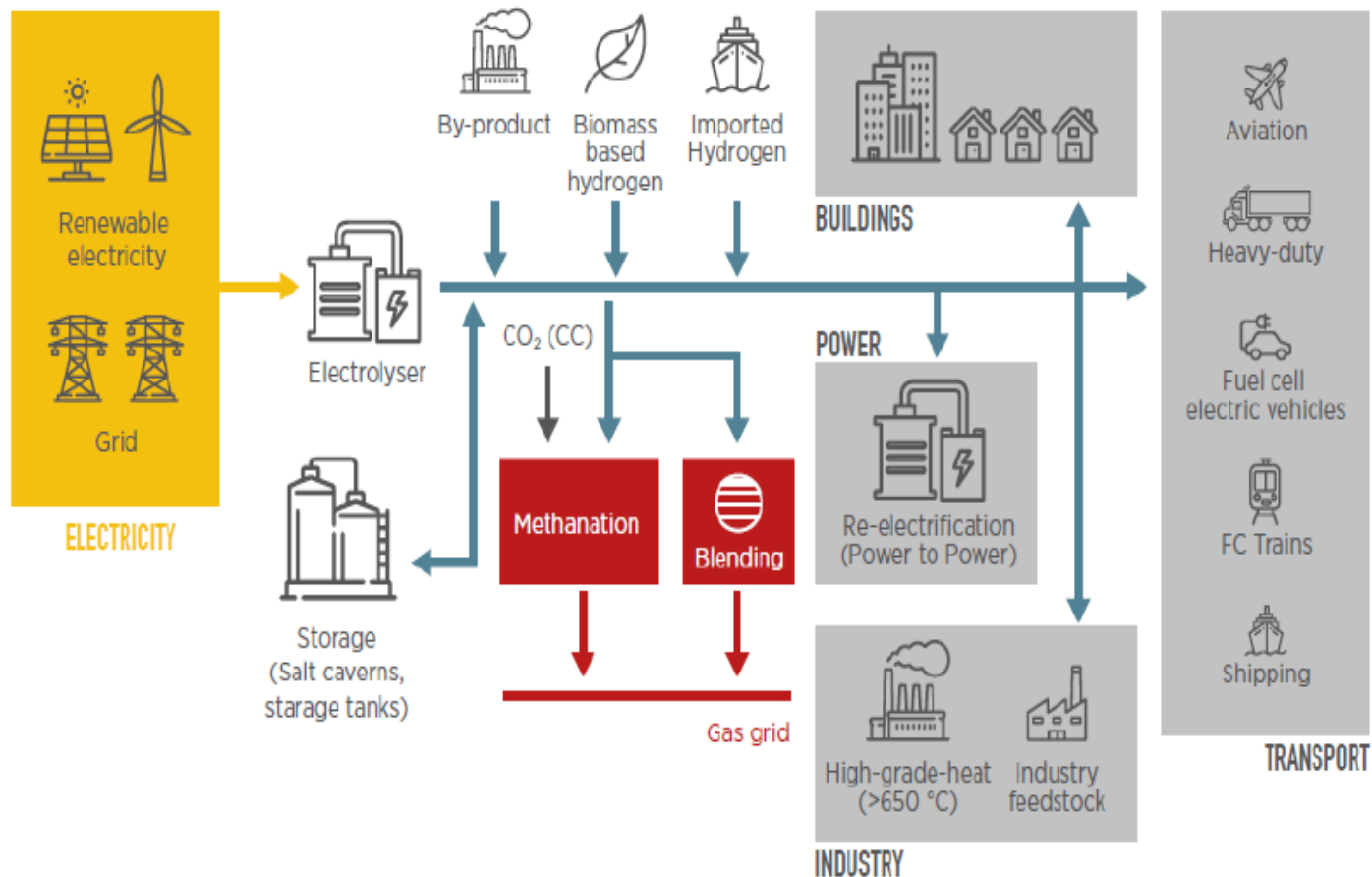
Fuente: AEH₂.

1. EL HIDRÓGENO. FUNDAMENTOS.

Integración de renovables para aplicaciones de uso final mediante hidrógeno



IRENA
(Septiembre 2018)



Fuente: AEH₂.

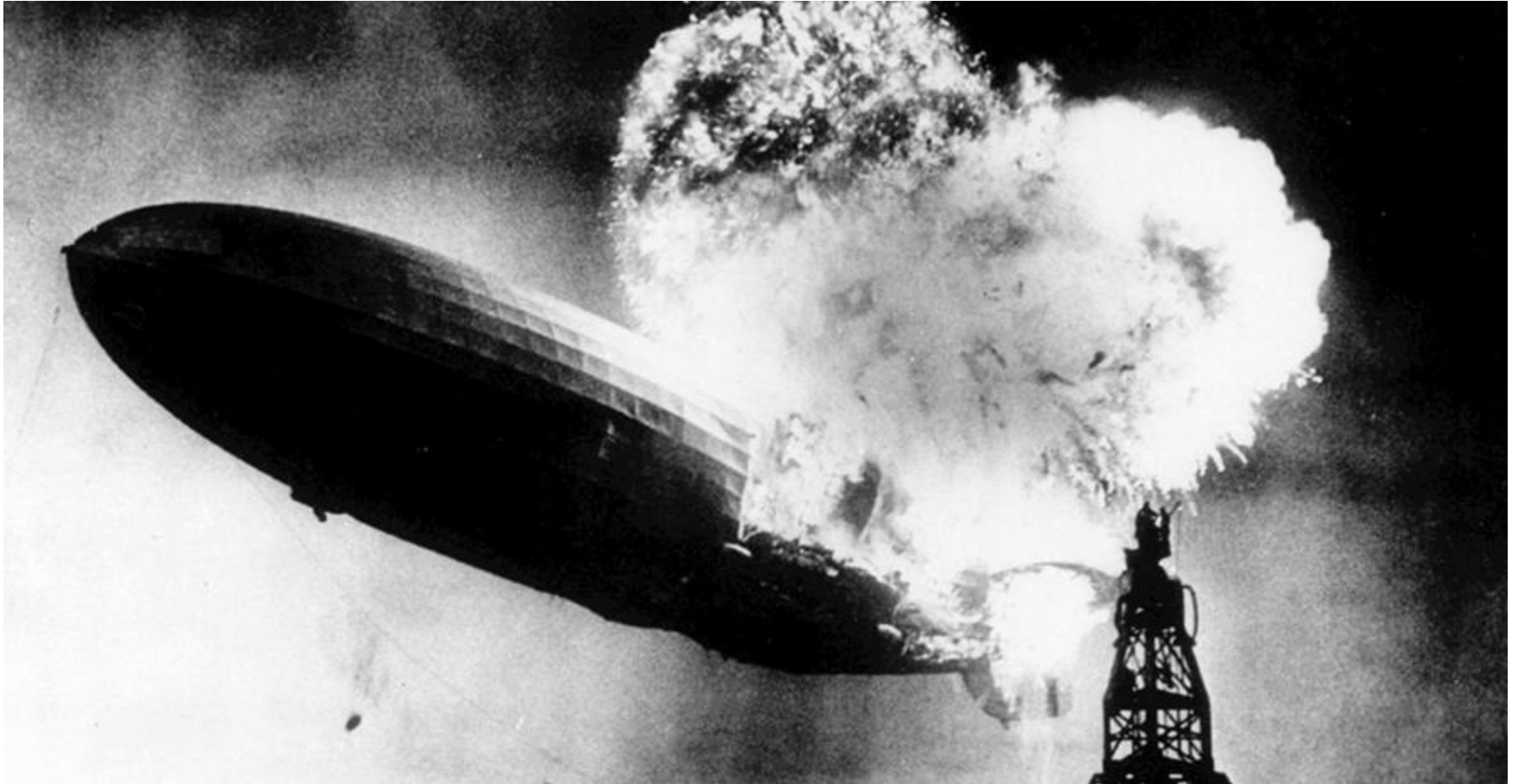
2. HIDRÓGENO. SEGURIDAD.

Aspecto	Incoloro
Olor	Inodoro
Punto de ebullición [°C]	-253
Temperatura de autoignición [°C]	500
Densidad [kg/Nm ³]	0,0899
Límite Inferior de Explosividad [% v/v]	4,0
Límite Superior Explosividad [%v/v]	77
Condiciones a evitar	Fuentes de ignición / Exposición al aire

· *Límite Inferior de Explosividad (LIE).*- Fracción volumétrica, expresada en porcentaje, de un gas o vapor inflamable en aire por debajo de la cual no se forma una atmósfera de gas explosiva.

· *Límite Superior de Explosividad (LSE).*- Fracción volumétrica, expresada en porcentaje, de gas o vapor inflamable en aire por encima de la cual no se forma un atmósfera explosiva.

2. HIDRÓGENO. SEGURIDAD.



2. HIDRÓGENO. SEGURIDAD.

- El Hindenburg fue un dirigible alemán, destruido a causa de un incendio cuando aterrizaba en Nueva Jersey el 6 de mayo de 1937. El accidente ocasionó la muerte de 36 personas (alrededor de un tercio de las personas a bordo). La causa más probable reconocida es la carga estática debido a una tormenta eléctrica.
- Fue cubierto con tela de algodón, barnizada con óxido de hierro y acetato-butirato de celulosa impregnado de polvo de aluminio (mezcla llamada «termita» que es muy inflamable).
- Inicialmente, el Hindenburg se diseñó para trabajar con helio, pero un embargo del ejército de Estados Unidos sobre este elemento obligó a los alemanes a utilizar hidrógeno.

2. HIDRÓGENO. SEGURIDAD.

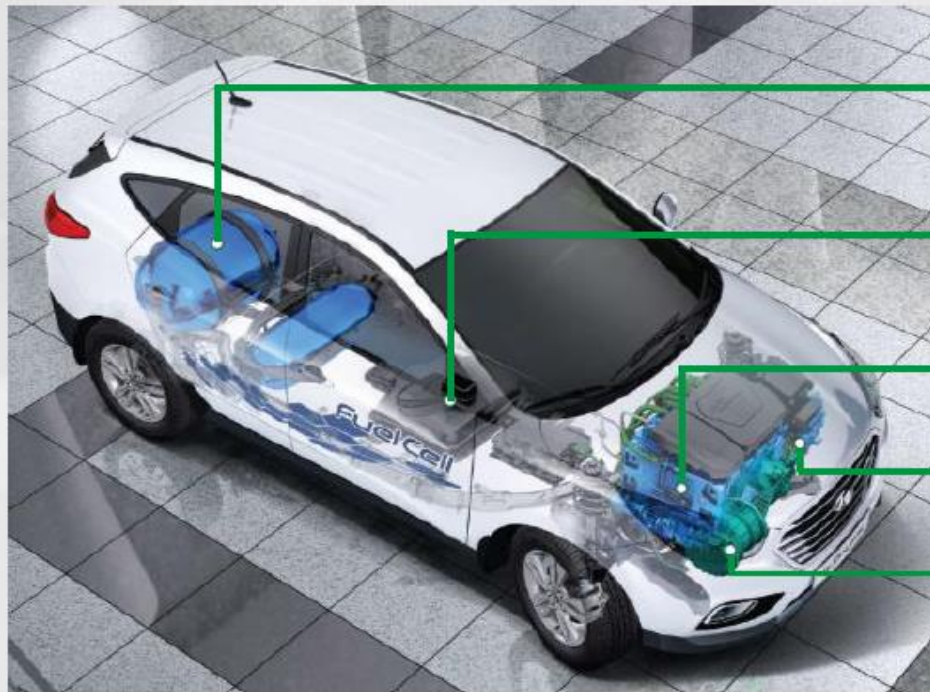
- El hidrógeno no es explosivo. El hidrógeno necesita una fuente de ignición externa para explotar o incendiarse, a diferencia de los explosivos, como el acetileno, que no la necesitan. Un ejemplo es lo sucedido en el Hindenburg.
- El hidrógeno no es tóxico. Ni el hidrógeno ni los productos de su combustión son tóxicos o perjudiciales.
- El hidrógeno tiene una alta difusividad, con lo que desaparece rápidamente si se escapa.
- El hidrogeno no forma una alfombra de fuego, lo que esta en contraste con los combustibles convencionales como la gasolina y el diésel.
- El calor radiante emitido por una llama de hidrógeno es diez veces menor a la que emite una llama de hidrocarburo, ya que la combustión de hidrógeno solo emite calor y agua.

2. HIDRÓGENO. SEGURIDAD.

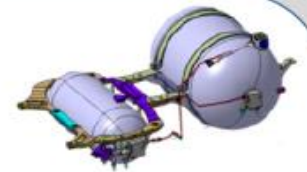
- En una atmosfera abierta, el hidrógeno se eleva rápidamente, con lo que la zona peligrosa ante una fuga de hidrógeno es relativamente pequeña. Esta zona es menor que la correspondiente a una fuga de metano o propano.
- La energía necesaria para incendiar una mezcla de hidrogeno a bajas concentraciones (inferiores al 10%), es mayor que la energía necesaria para incendiar el gas natural o la gasolina en sus respectivos rangos de inflamabilidad.
- El hidrogeno se quema rápidamente si se produce ignición.
- El hidrógeno no detona en una atmosfera abierta.
- El hidrogeno no contamina aguas ni suelos.
- No es radiactivo.
- No es cancerígeno.
- El hidrogeno arde en concentraciones significativamente mas bajas que el límite de detonación.

3. USO DE HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE.

Principales sistemas



Tanques de
hidrógeno



Batería
Alto voltaje



Pila de
combustible



Conversores



Motor
eléctrico



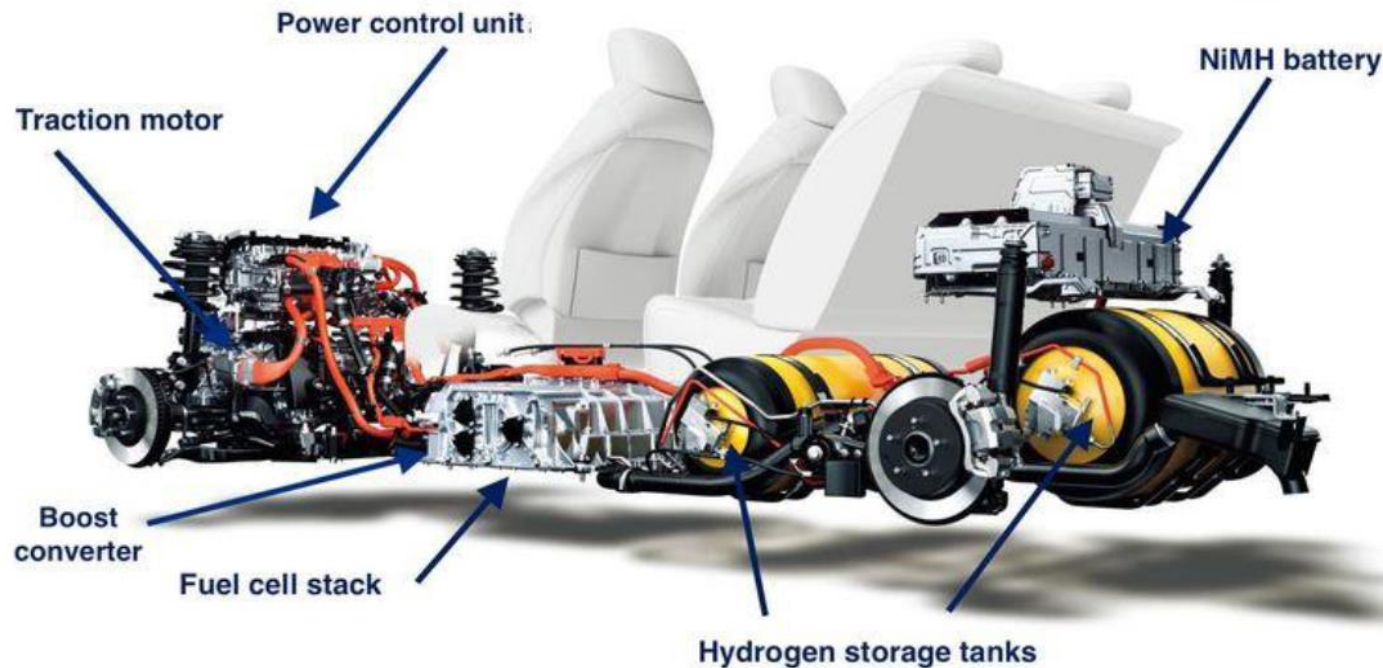
3. USO DE HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE.

Dedicated FCV



TOYOTA

ALWAYS A
BETTER WAY



3. USO DE HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE.

Toyota H₂ applications growing



TOYOTA

ALWAYS A
BETTER WAY



Toyota Fuel Cell Bus project – 100
buses for Tokyo 2020



Toyota Forklift

3. USO DE HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE.



3. USO DE HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE.

1. Compressed hydrogen storage

1.1. Introduction

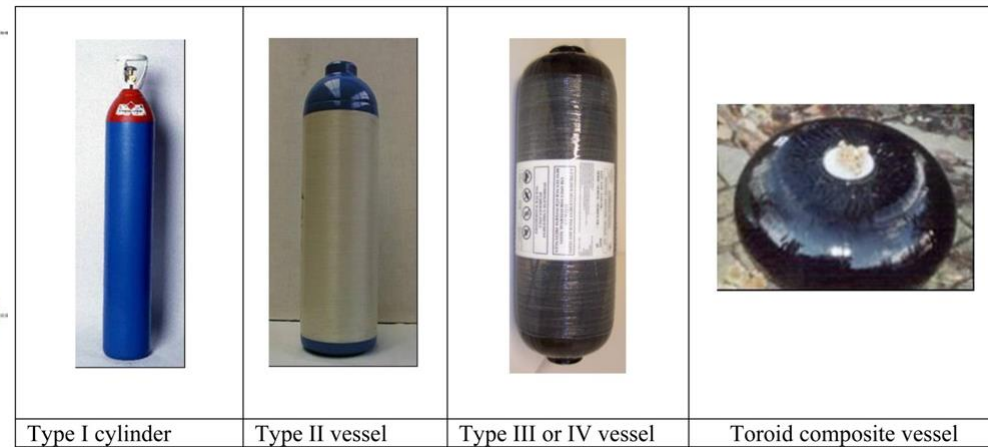
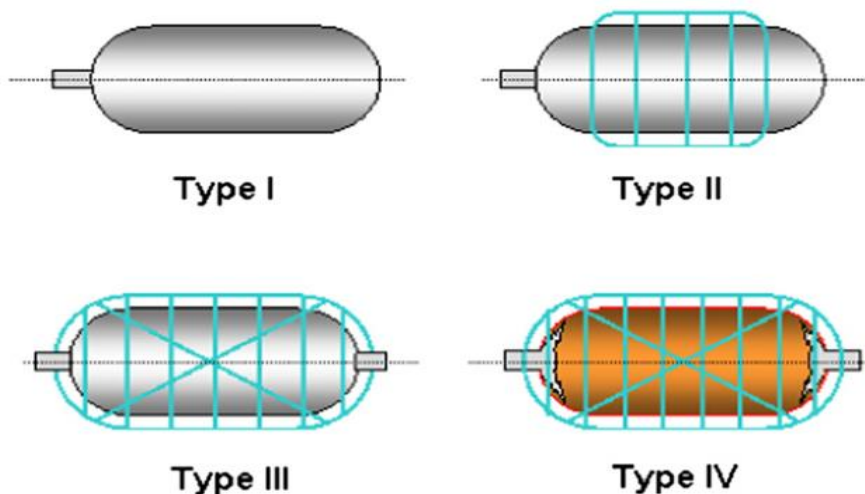
The following 4 types of high pressure vessels are classified (see Fig. 1):

- Type I: pressure vessel made of metal.
- Type II: pressure vessel made of a thick metallic liner hoop wrapped with a fiber-resin composite.
- Type III: pressure vessel made of a metallic liner fully-wrapped with a fiber-resin composite.

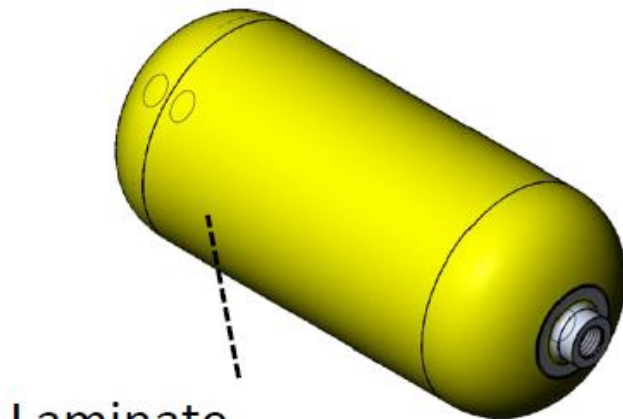
- Type IV: pressure vessel made of polymeric liner fully-wrapped with a fiber-resin composite. The port is metallic and integrated in the structure (boss).

The pressure vessels are generally cylinders, but composite vessels can also be polymorph or toroid (see Fig. 2).

Hydrogen can be stored in the four types of pressure vessels. The choice of the storage is based on the final application which requires a compromise between technical performances and cost-competitiveness. H_2 as industrial gas is stored in type I tanks, the pressure of which is from 150 to 300 bar (usually 200 bar). These are the most spread high



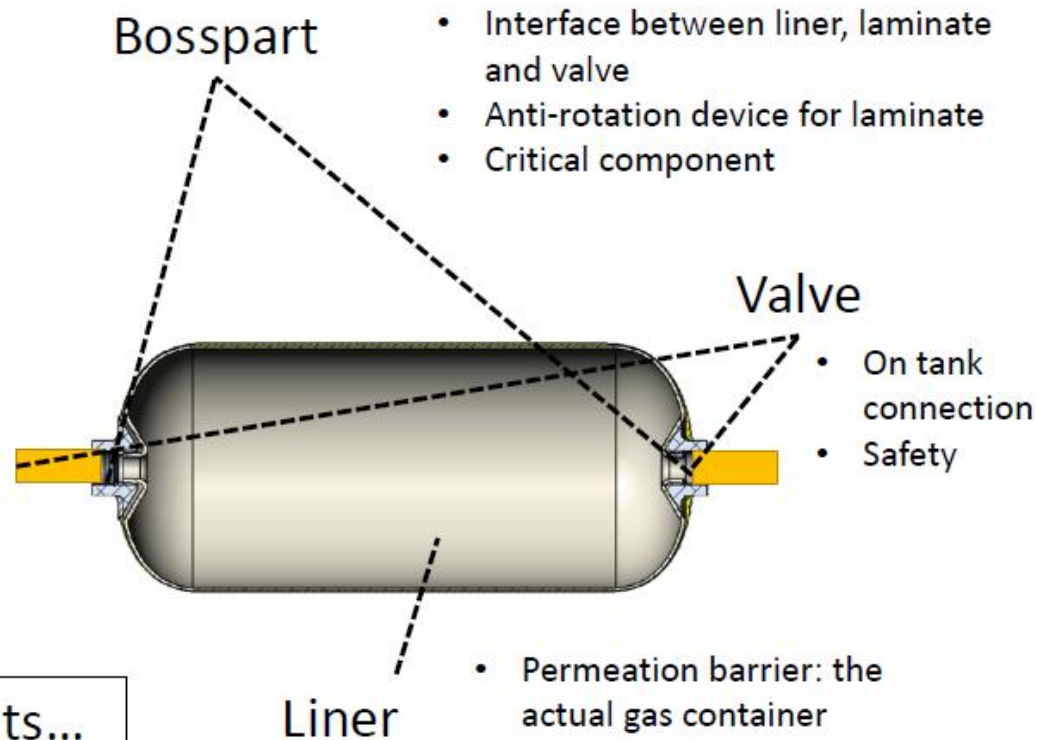
3. USO DE HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE.



Laminate

- Structural Load Bearing Shell
- "The expensive part"

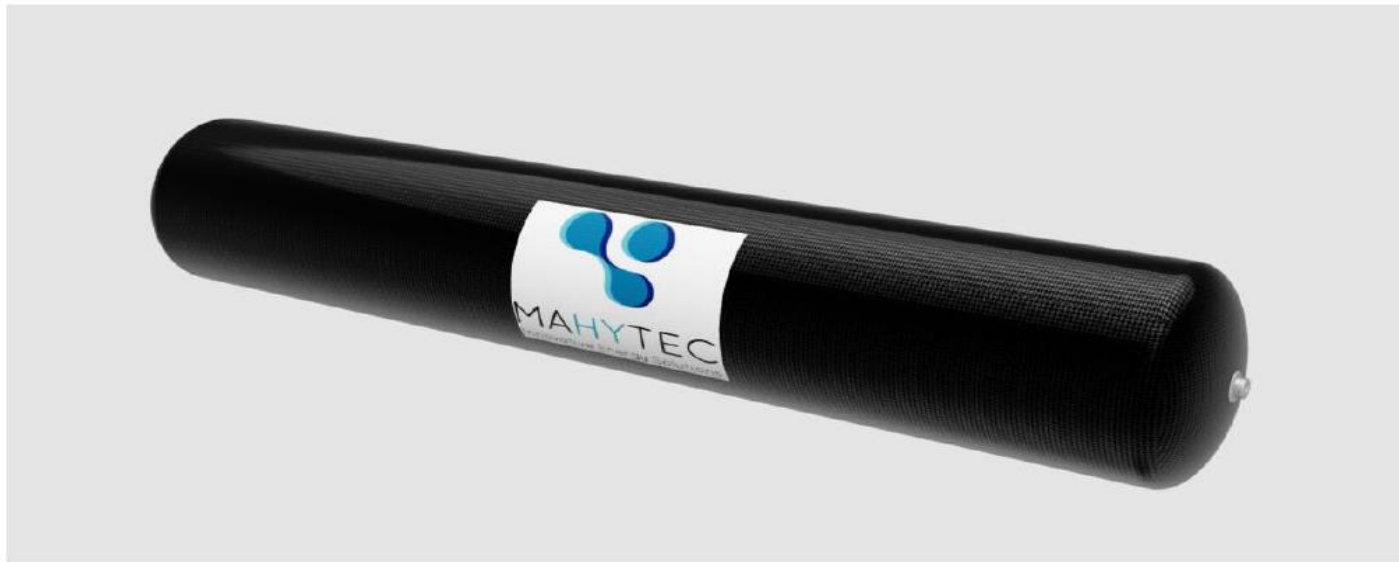
Fairly small amount of components...



3. USO DE HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE.

For hydrogen and gas storage

THE PERFECT SOLUTION FOR 350Bar REFUELLING STATION and GAS TRANSPORTATION



Could be installed/packaged in rack by 1, 2, 3,....

3. USO DE HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE.

Mass of hydrogen stored	9.7kg at 525 bar (15°)
Inner volume	300L
External Dimensions	Ø44cm x 307cm (without support)
Mass of empty tank	240kg
Temperature of use	From -20°C to 65°C
Maximum absolute refilling pressure	525bar
Hydraulic Pressure Test	790 bar
Body material	Type IV polymer liner with composite materials
Nozzle	2 – Stainless Steel
Tested according to	EN12245 or ASME Section X
Position of use	Vertical or horizontal

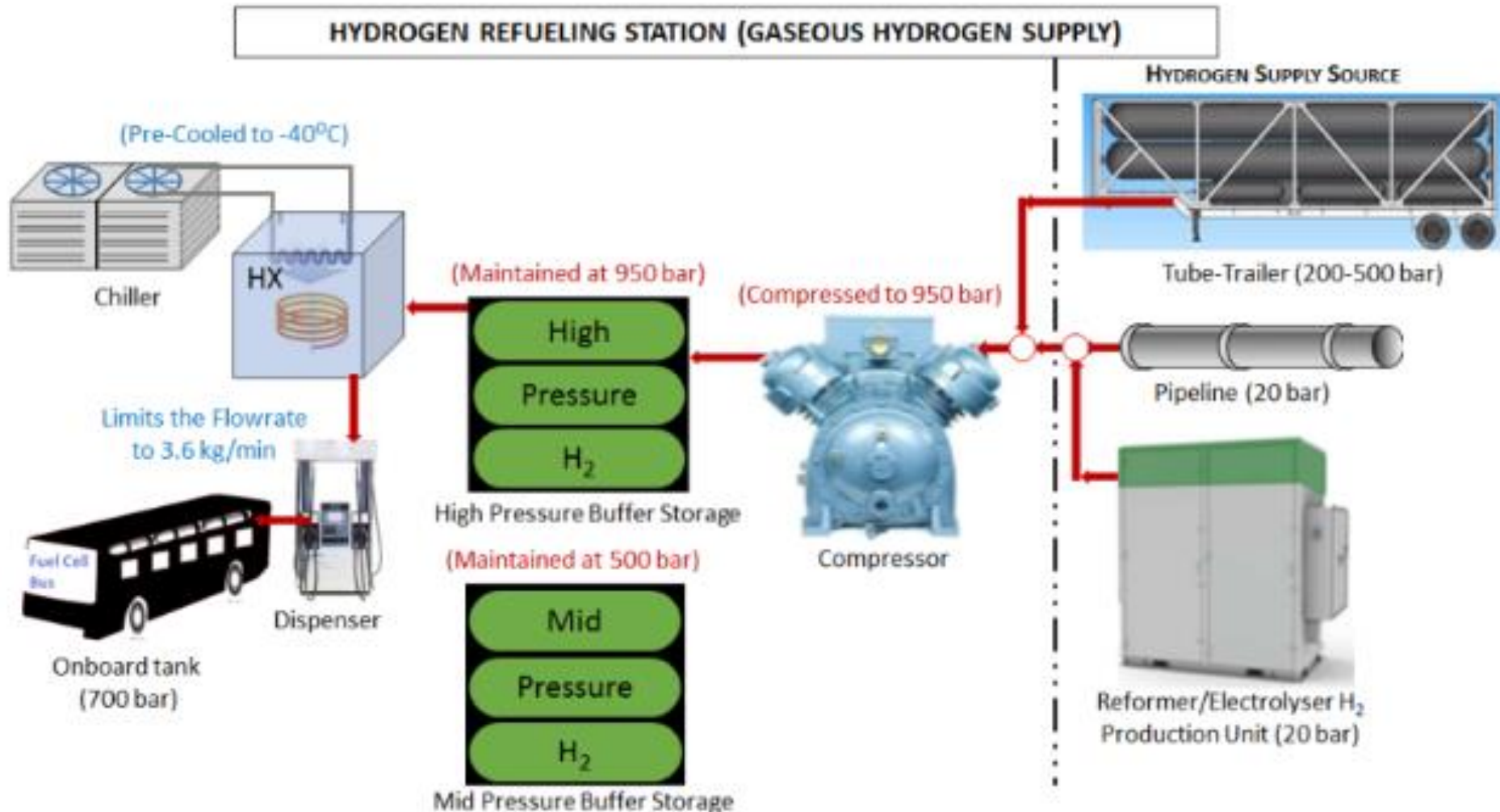
3. USO DE HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE.

- Certification according to EC79/2009. Compressed Gaseous Hydrogen
 - Tests of raw material
 - Corrosion test
 - Penetration (bullet) test
 - Composite flaw tolerance test
 - Hydraulic pressure test.
 - Burst test
 - Cycle test (ambient temperature)
 - Cycle test (extreme temperature)
 - Accelerated stress rupture test
 - Impact damage (drop) test
 - Leak test
 - Permeation test
 - Leak before break test
 - Chemical exposure test
 - Bonfire test
 - Boss torque test
 - Hydrogen cycle test

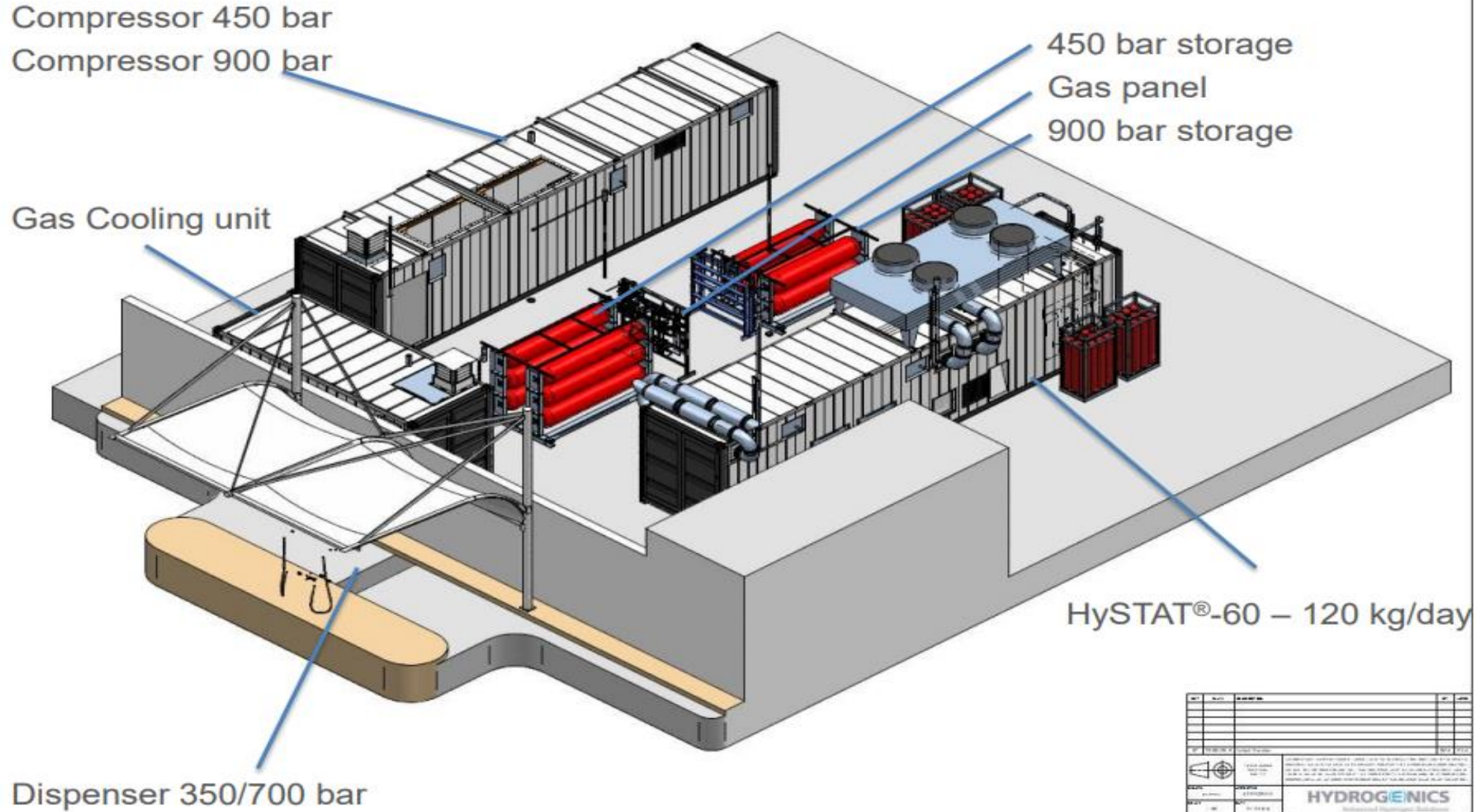
3. USO DE HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE.

- <https://www.youtube.com/watch?v=lknzEAs34r0>
- <https://www.youtube.com/watch?v=ccVl4pPwLxM>
- <https://www.youtube.com/watch?v=7fNH3RBIQK8>

3. USO DE HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE.



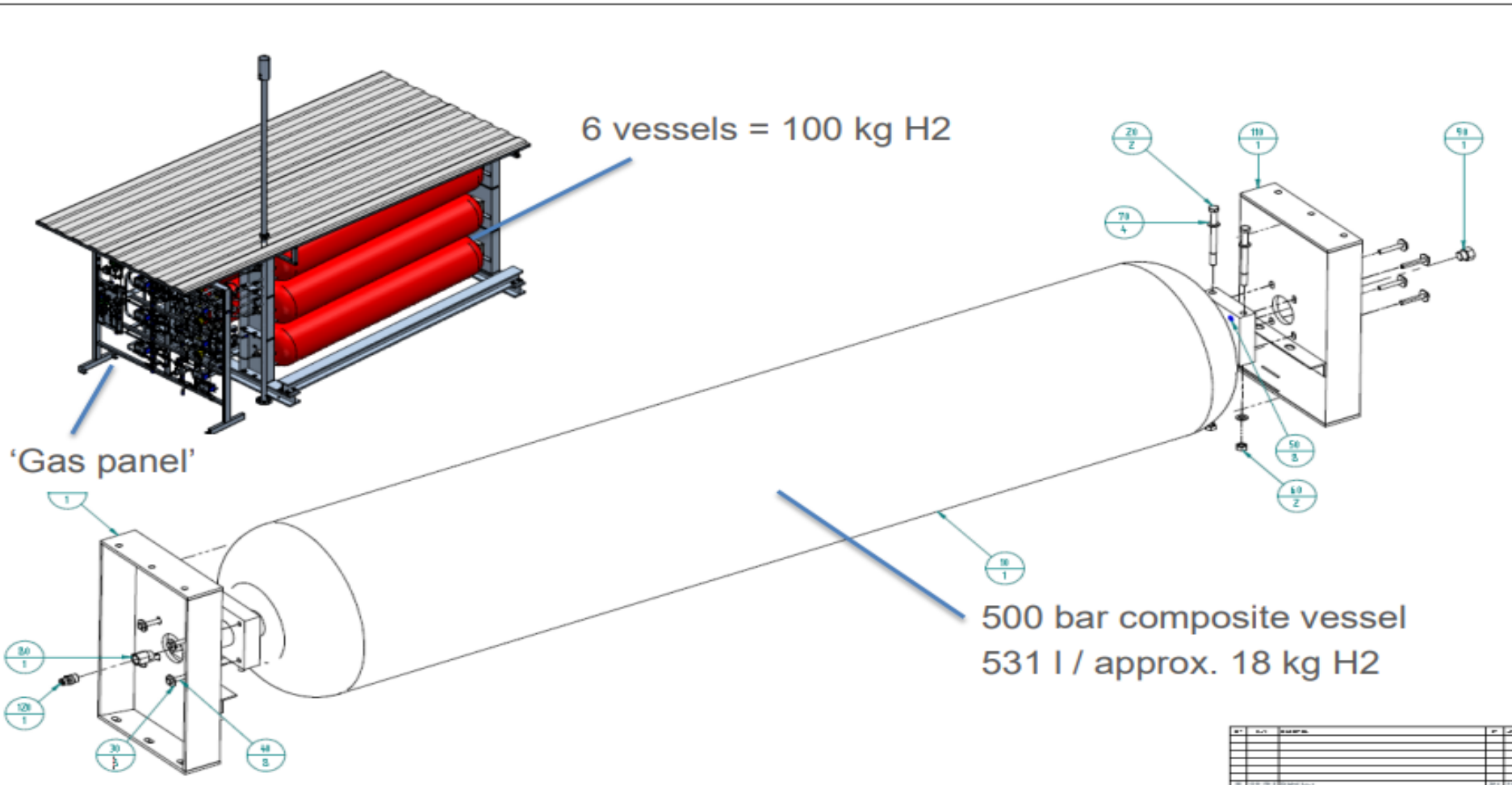
3. USO DE HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE.



Rev.	Descripción	Elaborado por	Revisado por	Fecha
01	01			
02	02			
03	03			
04	04			
05	05			
06	06			
07	07			
08	08			
09	09			
10	10			
11	11			
12	12			
13	13			
14	14			
15	15			
16	16			
17	17			
18	18			
19	19			
20	20			
21	21			
22	22			
23	23			
24	24			
25	25			
26	26			
27	27			
28	28			
29	29			
30	30			
31	31			
32	32			
33	33			
34	34			
35	35			
36	36			
37	37			
38	38			
39	39			
40	40			
41	41			
42	42			
43	43			
44	44			
45	45			
46	46			
47	47			
48	48			
49	49			
50	50			
51	51			
52	52			
53	53			
54	54			
55	55			
56	56			
57	57			
58	58			
59	59			
60	60			
61	61			
62	62			
63	63			
64	64			
65	65			
66	66			
67	67			
68	68			
69	69			
70	70			
71	71			
72	72			
73	73			
74	74			
75	75			
76	76			
77	77			
78	78			
79	79			
80	80			
81	81			
82	82			
83	83			
84	84			
85	85			
86	86			
87	87			
88	88			
89	89			
90	90			
91	91			
92	92			
93	93			
94	94			
95	95			
96	96			
97	97			
98	98			
99	99			
100	100			

3. USO DE HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE.

450 bar storage



Rev.	Desc.	Elaborado por	Revisado por	Fecha
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

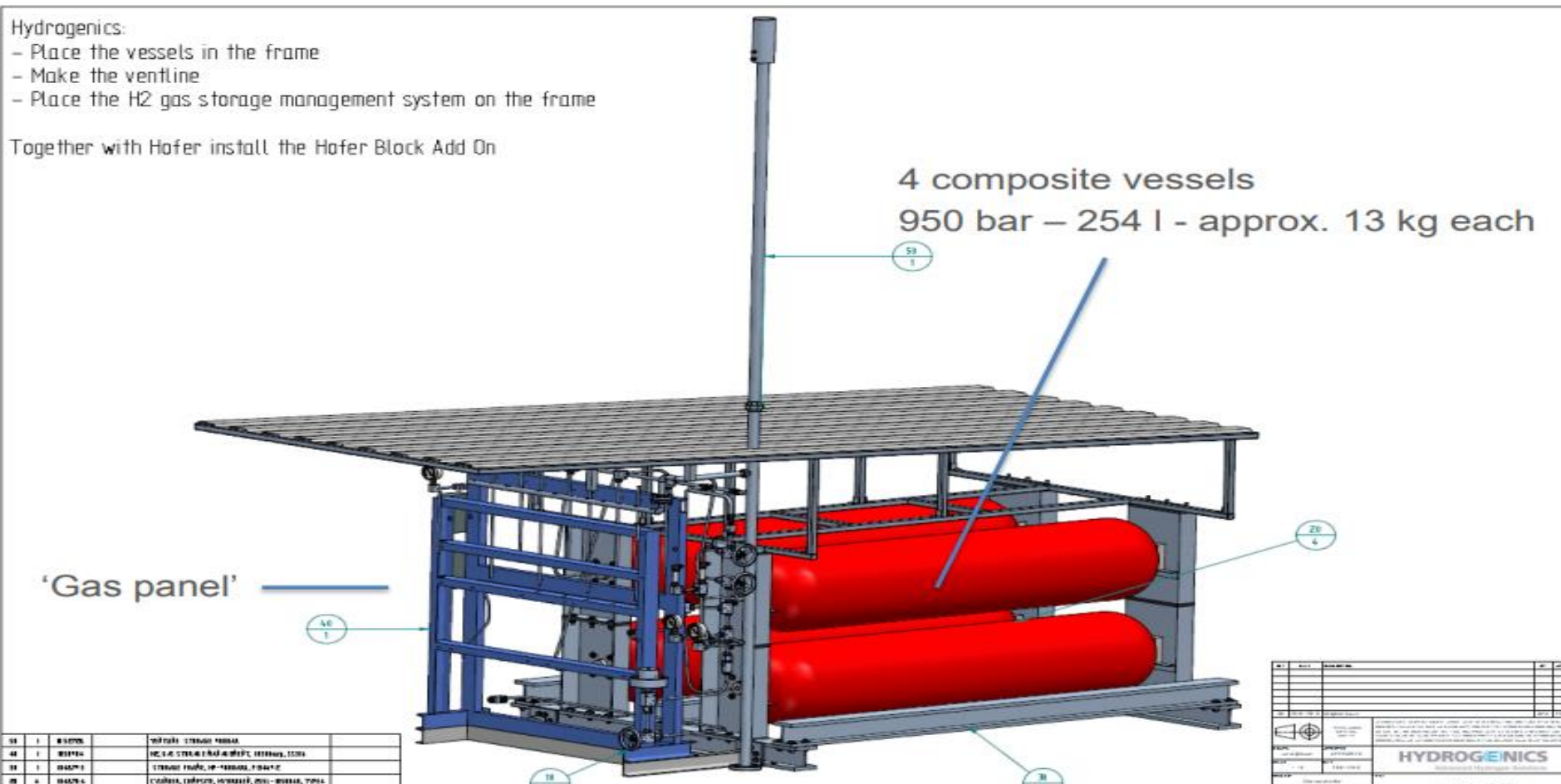
3. USO DE HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE.

900 bar storage

Hydrogenics:

- Place the vessels in the frame
- Make the ventline
- Place the H₂ gas storage management system on the frame

Together with Hofer install the Hofer Block Add On



3. USO DE HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE.

Jun 11, 2019 - 01:10 pm

Norway: Explosion at hydrogen filling station

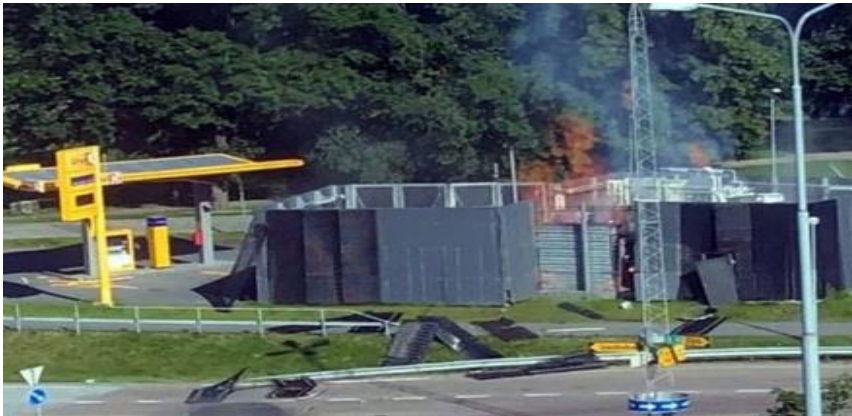
FCEV FUEL CELLS HYDROGEN HYDROGEN STATIONS NEL NORWAY SANDVIKA UNO-X



In Sandvika near Oslo, an explosion occurred at a hydrogen filling station for fuel cell cars on Monday. Until establishing the cause of the incident, the supplier Nel has closed ten more stations.

+ + Kindly see our updates below + +

According to Norwegian media, the explosion took place on Monday around 5:30 pm at the Uno-X station in the Oslo suburb of Sandvika. According to the company, no one was injured but one report mentions two minor injuries.



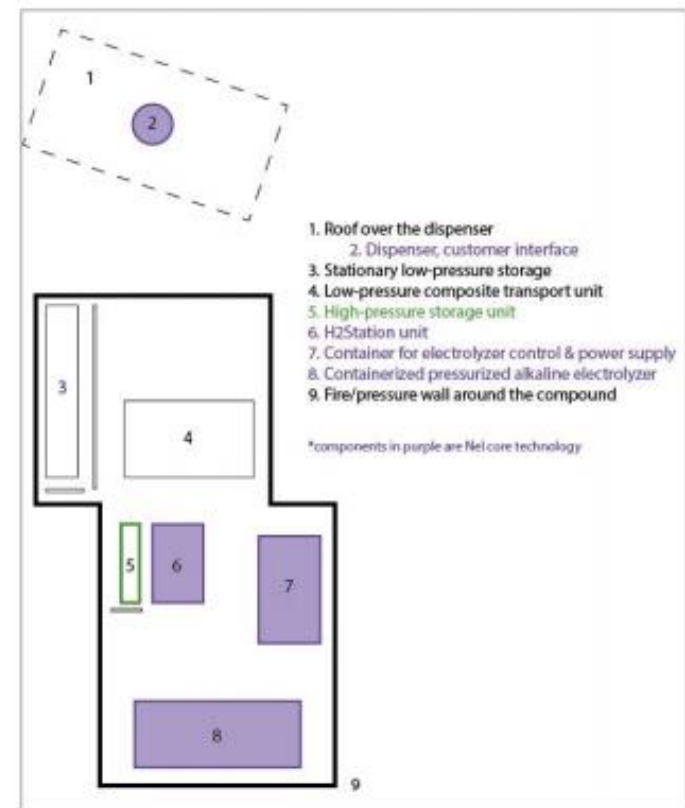
3. USO DE HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE.

The Kjørbo site

Kjørbo incident

Background

- Opened 2016
- Owned by Uno-X Hydrogen
 - JV between Uno-X, Nel, and Nippon Gases (formerly Praxair)
- Nel H2Station® with on-site hydrogen production from electrolysis
 - Product family: CAR-200 Europe



Drawing for illustrative purposes only. Not to scale.

5

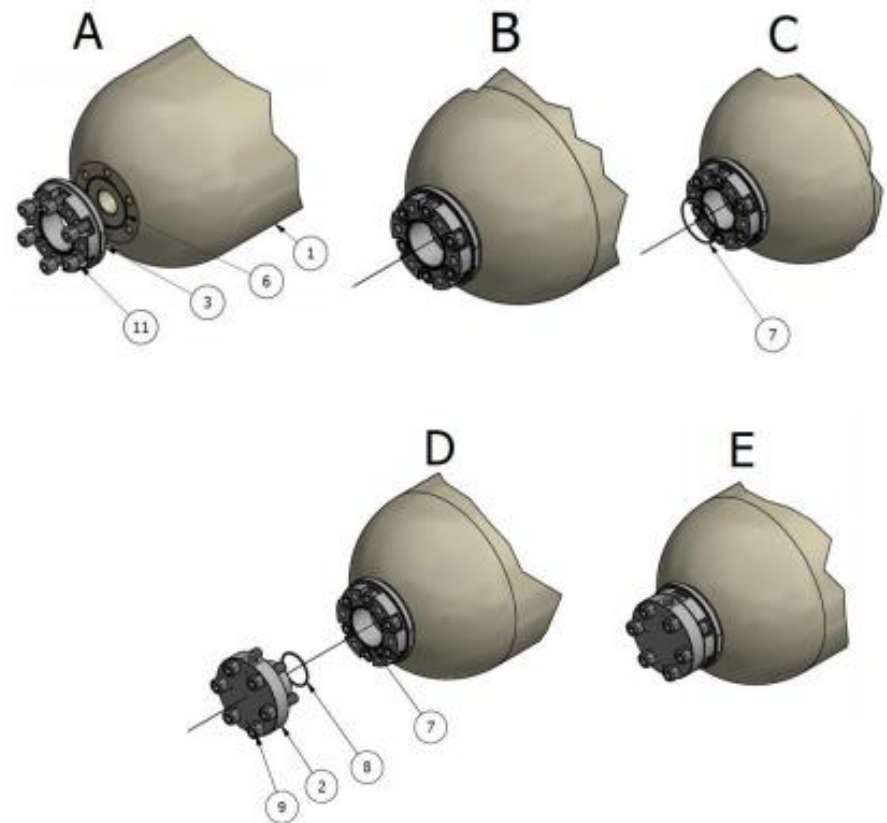
3. USO DE HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE.

Root cause

Kjarbo incident

Non-core Nel technology

- Assembly error in high-pressure storage unit
- Unit consists of steel tanks and other components by third parties, some of which are designed by Nel



3. USO DE HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE.

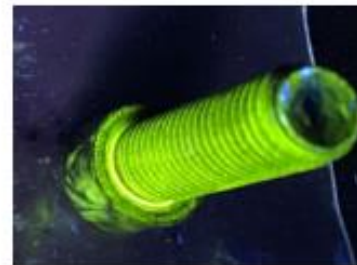
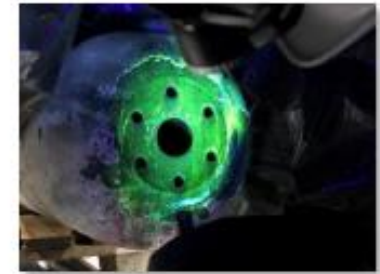
Analysis involving Gexcon, SINTEF, and Bureau Veritas

Kjørbo incident

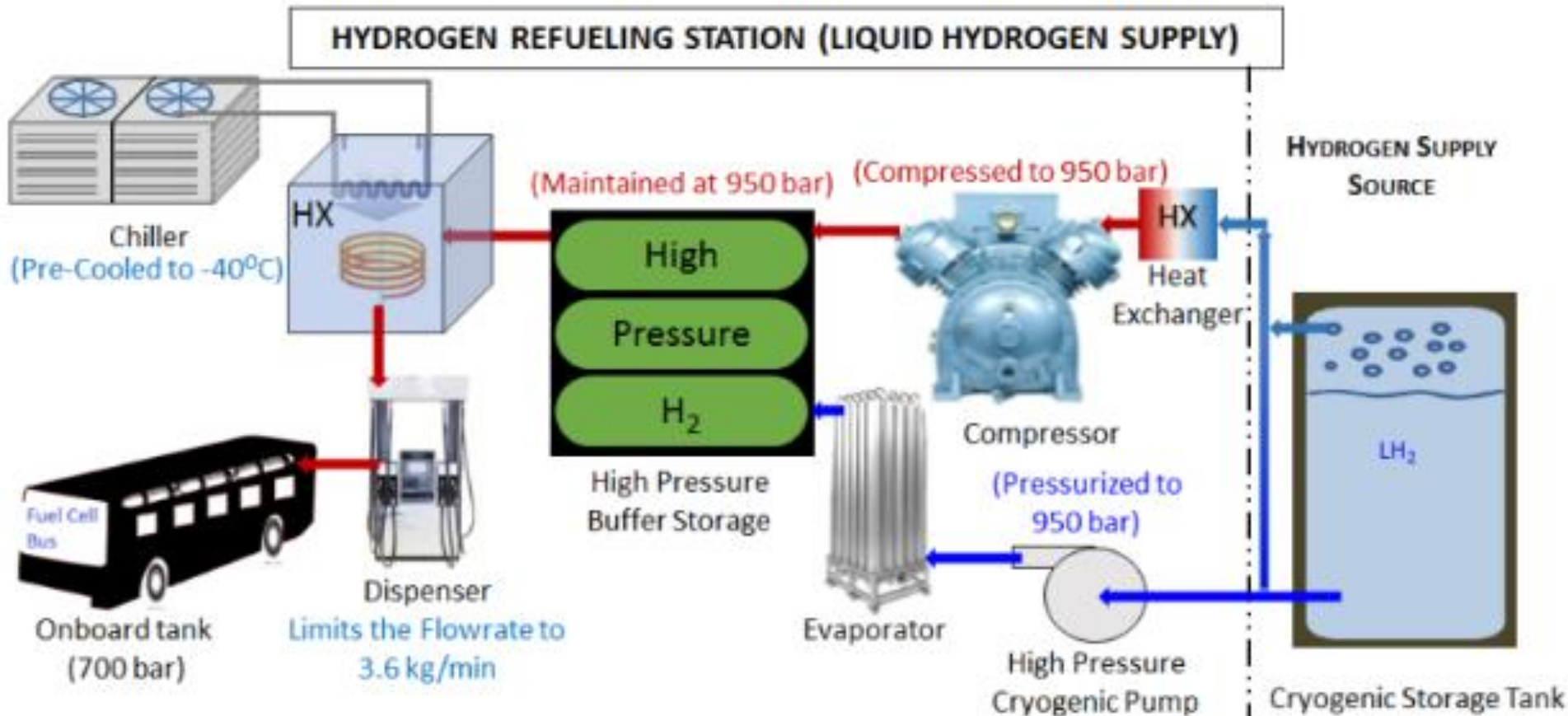
Investigation overview

- **Materials - OK**
 - Magnetic particle inspection
 - Penetrant testing
 - Verification of materials
- **Design - OK**
 - 1,000,000 cycle accelerated test
- **Assembly – NOT OK**
 - Bolt analysis
 - Physical gap
 - Opening torque

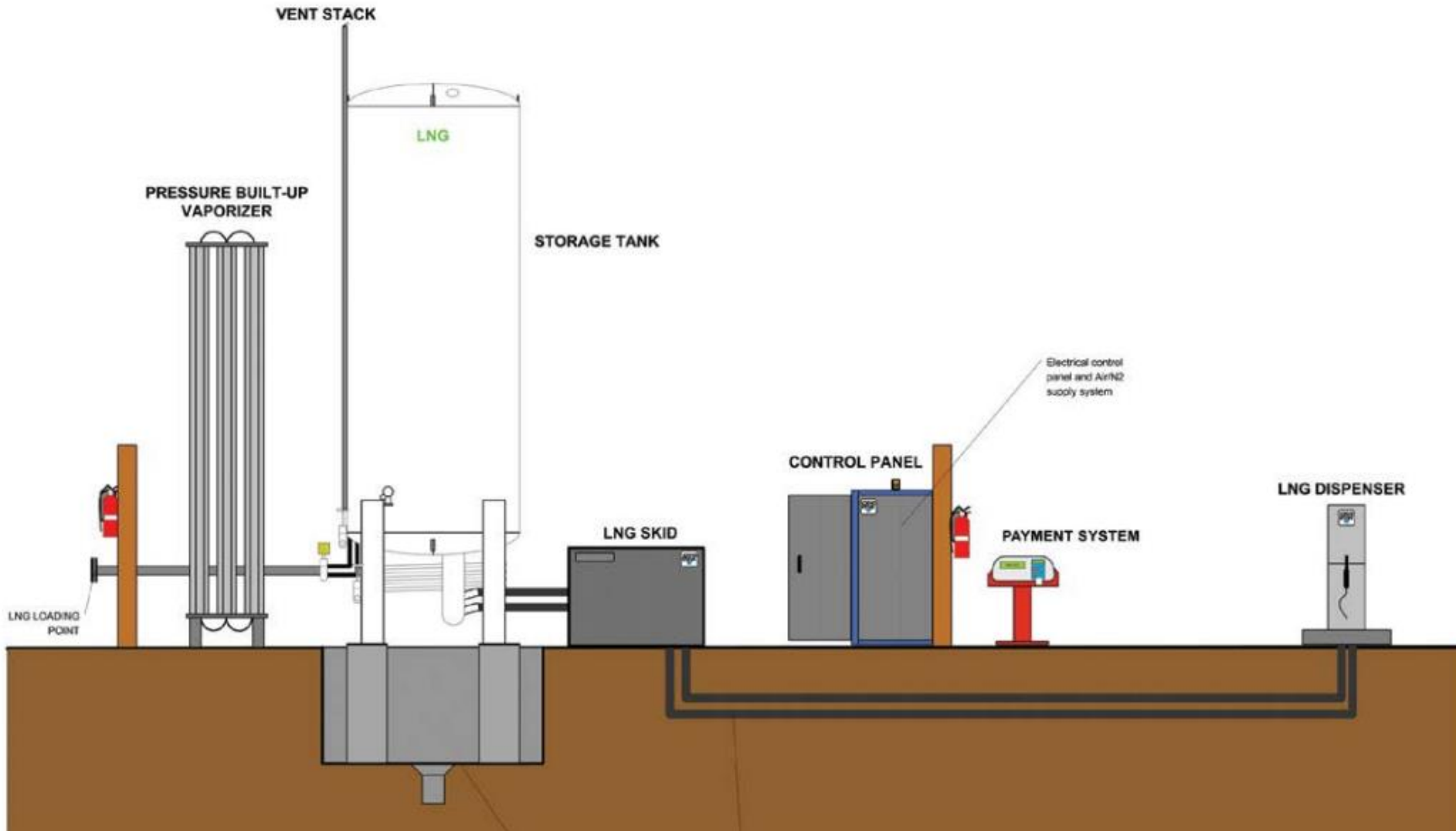
Plug assembly analysis & testing



3. USO DE HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE.



3. USO DE HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE.

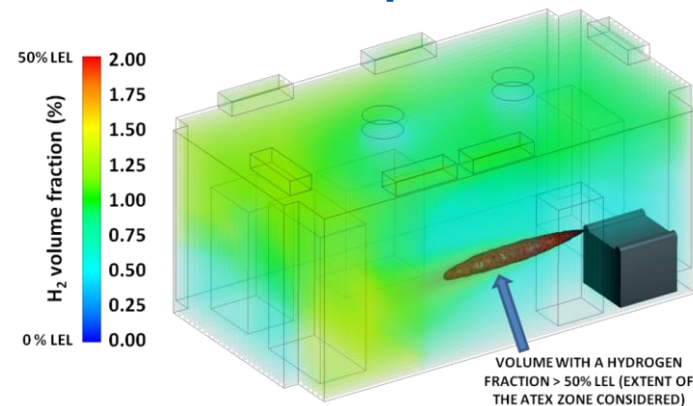


4. USO DE HIDRÓGENO ESTACIONARIO.

1. Medidas de seguridad de carácter preventivo para evitar acumulación de hidrógeno
 - Instalación de detectores de hidrógeno
 - Instalación de sistemas de evacuación de hidrógeno
2. Medidas para evitar la ignición de una posible acumulación de hidrógeno
3. Medidas para mitigar los posibles efectos de una explosión



Detector de hidrógeno



Modelado de fugas

4. USO DE HIDRÓGENO ESTACIONARIO.

DIRECTIVAS Y REGLAMENTOS

- Directivas ATEX (1999/92 CE Y 2014/34/UE)
- Directiva PED (Equipos a presión)
- Directiva EMC (Compatibilidad Electromagnética)
- Directiva de Seguridad de la Maquinaria
- SEVESO III (directiva 2012/18/UE).

4. USO DE HIDRÓGENO ESTACIONARIO.

1. Determinar y evaluar los riesgos de explosión derivados de una atmósfera explosiva:
 - La probabilidad de formación de atmósferas explosivas y su duración.
 - La probabilidad de la presencia y activación de fuentes de ignición.
 - Las proporciones de los efectos previsibles.
2. Determinar las medidas a adoptar para garantizar el cumplimiento de los objetivos del **R.D. 681/2003**, de 12 de junio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo.
3. Clasificar las áreas en las que pueden formarse atmósferas explosivas en zonas, de conformidad con el Anexo I del **R.D 681/2003**.
4. Definir las áreas en las que será de aplicación los requisitos mínimos establecidos en el Anexo II del **R.D. 681/2003**.

4. USO DE HIDRÓGENO ESTACIONARIO.

UNE-EN 60079-10-1:2010 Clasificación de emplazamientos. Atmósferas explosivas gaseosas.

UNE 202007:2006 Guía de aplicación de la norma UNE 60079-10



Zona 0: Emplazamiento en el que está presente una atmósfera explosiva gaseosa de forma continua, durante largos periodos o frecuentemente.

Zona 1: Emplazamiento en el que es probable que se produzca una atmósfera explosiva gaseosa ocasionalmente en funcionamiento normal.

Zona 2: Emplazamiento en el que no es probable que se produzca una atmósfera explosiva gaseosa en funcionamiento normal, pero si se genera persiste solo **durante un corto periodo.**

5. CONCLUSIONES.

- Las tecnologías del hidrógeno no son mas peligrosas que lo son a día de hoy la tecnología de combustibles fósiles.
- En los últimos años ha habido avances importantes en la seguridad sobre todo de los sistemas de almacenamiento de hidrógeno.
- Existen vehículos de hidrógeno que han recibido premios como vehículos mas seguros de su categoría.
- A nivel estacionario, existen normativas aplicables a otros sectores que se utilizan habitualmente para el diseño de aplicaciones en las que el hidrógeno esta presente.
- A medida que se masifique el uso del hidrógeno como vector energético, se desarrollarán nuevos estándares de seguridad que complementarán a lo que existe actualmente.

MUCHAS GRACIAS POR VUESTRA ATENCION.

Dr. Carlos Fúnez Guerra

**Responsable de la Unidad de Innovación Abierta del Centro Nacional del
Hidrógeno.**

carlos.funez@cnh2.es

