Copyright © ADEPRON Tutti i Diritti Riservati - www.adepron.it

PRODUZIONE DI H_2 PER VIA NUCLEARE MEDIANTE STEAM REFORMING

Guglielmo LOMONACO *, Pierpaolo ROCCHI **, Vincenzo ROMANELLO ***

* *Ingegnere Nucleare, Dottorato di Ricerca in "Ingegneria Elettrica e Termica", Assistant Professor presso l'Università di Genova*

** *Ingegnere della Sicurezza Industriale e Nucleare*

*** *Ingegnere Nucleare – orientamento "Impianti Nucleari Innovativi", Dottorato di Ricerca in "Ingegneria dei Materiali", ricercatore presso il Karlsruhe Institute of Technology (KIT) in Germania*

INTRODUZIONE

Dato il continuo aumento della popolazione terrestre (oggi la popolazione mondiale si aggira intorno a 6 miliardi di abitanti, secondo alcune proiezioni dovrebbe sfiorare gli 8 miliardi nel 2030) e quindi della domanda di energia (anche perché un adeguato approvvigionamento energetico fa parte dei più elementari diritti umani) sono divenute sempre più importanti (e sempre più lo diverranno) negli ultimi anni le preoccupazioni mondiali nell'ambito dei rifornimenti energetici e dell'impatto ambientale antropogenico. In tal senso appare evidente che l'opzione nucleare potrà contribuire significativamente alla risoluzione del problema.
Negli ultimi anni l'idrogeno ha focalizzato l'attenzione della comunità scientifica date la sua abbondanza (anche se non allo stato libero) ed il suo ridotto impatto ambientale nella produzione energetica (sia nei motori a combustione interna che nella emergente tecnologia delle celle a combustibile). É possibile infatti realizzare motori a combustione interna che oltre a non emettere particolato, CO, CO_2, SO_2, ed idrocarburi incombusti ha anche bassissime emissioni di NO_x (grazie alla diminuzione della temperatura della fiamma). Le celle a combustibile non presentano alcun tipo di emissioni. I problemi nell'utilizzo di questa fonte energetica riguardano l'accumulo ed il trasporto (l'idrogeno è un gas molto leggero, difficilmente liquefabile).
Infatti si deve sempre ricordare che l'idrogeno è un vettore energetico e non una fonte di energia. L'energia necessaria per la sua produzione deve, pertanto, essere fornita da qualche altra fonte primaria.
Attualmente il sistema più diffuso prevede il ricorso ai combustibili fossili, in particolare al gas naturale. Dato il basso prezzo attuale di quest'ultimo l'idrogeno attualmente viene prodotto principalmente per questa via (*Steam Reforming* con vapore). Si deve rammentare però che innanzitutto tale fonte non è rinnovabile, emette importanti quantitativi di emissioni di gas serra (circa 10 Kg per Kg di idrogeno prodotto), ed inoltre che per paesi come il nostro non contribuisce al raggiungimento dell'indipendenza energetica e della diversificazione delle fonti.
In tal senso il calore nucleare prodotto dal *Reattore ad Alta Temperatura* (*HTR*) può fornire un significativo aiuto in quanto fonte di calore ad alta temperatura a buon prezzo ed esente da emissioni di gas serra (si ricordi che attualmente circa il 45% del metano utilizzato nello steam reforming viene utilizzato per produrre il calore necessario per la reazione).
Tuttavia bisogna ricordare che il gas naturale ha subito notevoli variazioni di prezzo negli anni, e che secondo alcune stime il suo prezzo continuerà a crescere. Se inoltre le preoccupazioni ambientali in merito al riscaldamento globale legato in particolare alle emissioni di CO_2 prevarranno (e pertanto verrà introdotta una carbon tax) il prezzo dell'idrogeno prodotto con processi nucleari potrebbe nel breve periodo essere paragonabile, o addirittura inferiore, a quello prodotto con i sistemi tradizionali attuali.
Nell'ambito del presente lavoro si è preso in considerazione l'apparato sperimentale, utilizzato dalla JAERI per la produzione di idrogeno con il processo di steam reforming, per svolgere un'analisi preliminare di sicurezza mirante alla determinazione dei punti critici dello stesso ai fini della sicurezza. In seguito sono state anche considerate le conseguenze di una ipotetica sequenza incidentale che prevedesse la fuoriuscita di idrogeno nelle condizioni fisico-chimiche nelle quali si trova all'interno dell'impianto.

STEAM REFORMING DEL METANO PER LA PRODUZIONE DI H_2 E METANOLO

Questa tecnologia è un sistema ampiamente sperimentato ed economico per produrre idrogeno. Probabilmente sarà uno processi più importanti per la produzione di questo vettore energetico nei prossimi anni. Le reazioni chimiche di base per il processo sono:

(1) $CH_4 + H_2O = 3H_2 + CO$ – 49 kcal/mol

(2) $CH_4 + 2H_2O = 4H_2 + CO_2$ – 39 kcal/mol

Copyright © ADEPRON Tutti i Diritti Riservati - www.adepron.it

In particolare per la seconda reazione stechiometrica (in cui una molecola di metano reagisce con due di vapore acqueo fornendone una di anidride carbonica e quattro di idrogeno) si liberano 7 Kg di CO_2 per Kg di H_2 prodotto.

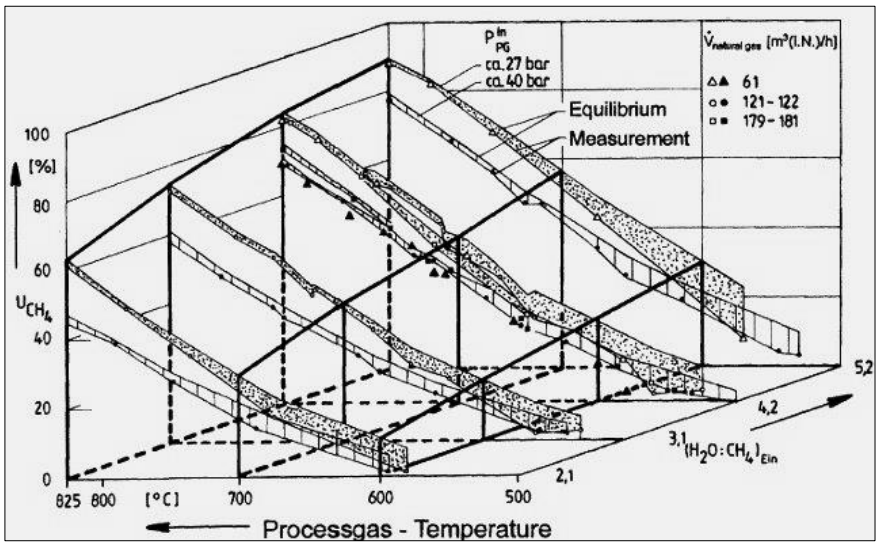

Figura 1

Nella Figura 1 sono sintetizzati i parametri del processo ed in particolare il rendimento della conversione del CH_4 nel reforming in funzione della temperatura e del rapporto H_2O/CH_4.

STEAM REFORMING PER VIA NUCLEARE

Le reazioni di formazione dell'idrogeno sono endotermiche e, nei processi tradizionali, occorre bruciare combustibili fossili per fornire il calore richiesto. I reattori HTR potrebbero fornire il calore necessario alla reazione con un notevole risparmio di risorse e una diminuzione dell'emissione di gas ad elevato impatto ambientale.
La JAERI ha effettuato una serie di studi per verificare la possibilità di utilizzare questo processo accoppiato al reattore HTTR. I test dell'impianto sperimentale sono previsti per il 2007. I punti fondamentali dello studio riguardano la possibilità di utilizzare un reformer di nuova concezione e un generatore di vapore a convezione naturale integrato con uno condensatore ad aria a circolazione naturale.

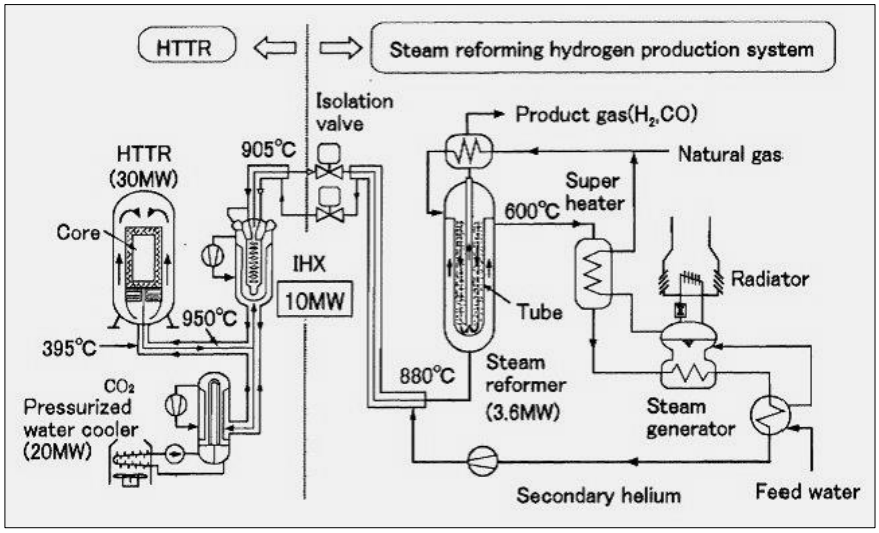

Figura 2

Particolar attenzione è stata posta nello sviluppo e nella progettazione dei concetti di sicurezza, in particolare per ciò che riguarda gli incendi e le esplosioni che si possono originare nell'impianto. Il diagramma di flusso dell'impianto è riportato nelle Figura 2.

Il programma New Sunshine avviato in Giappone nel 1993 prevedeva una serie di studi sui possibili sistemi per la produzione di idrogeno. All'interno di questo programma è stata studiata la possibilità di utilizzare un reattore HTGR per fornire il calore necessario per il processo di Steam Reforming ottenendo un elevato rendimento del processo e azzerando le emissioni di CO_2. Questo processo è in grado di produrre vettori energetici a basso impatto ambientale riducendo al contempo l'inquinamento ambientale. La JAERI ha studiato la possibilità di accoppiare il reattore HTTR ad un impianto per la produzione di idrogeno e metanolo.

Il processo analizzato presenta le seguenti caratteristiche:

Copyright © ADEPRON Tutti i Diritti Riservati - www.adepron.it

- È altamente probabile la fattibilità di un siffatto sistema in quanto coinvolge tecnologie sperimentate e conosciute;
- Dimostrare la fattibilità dell'accoppiamento tra lo steam reforming e il reattore HTTR aprirebbe la strada ad altre sperimentazioni nel campo dello sfruttamento del calore ottenuto per via nucleare;
- Lo steam reforming tramite impianto nucleare come mezzo per la produzione di idrogeno senza emissione di CO_2 potrebbe essere il punto di partenza per la transizione a uno scenario energetico basato sull'utilizzo dell'idrogeno come principale vettore energetico in luogo dei combustibili da idrocarburi;
- Alcune delle tecnologie necessarie sono già state sviluppate nel corso di altre campagne di studio.

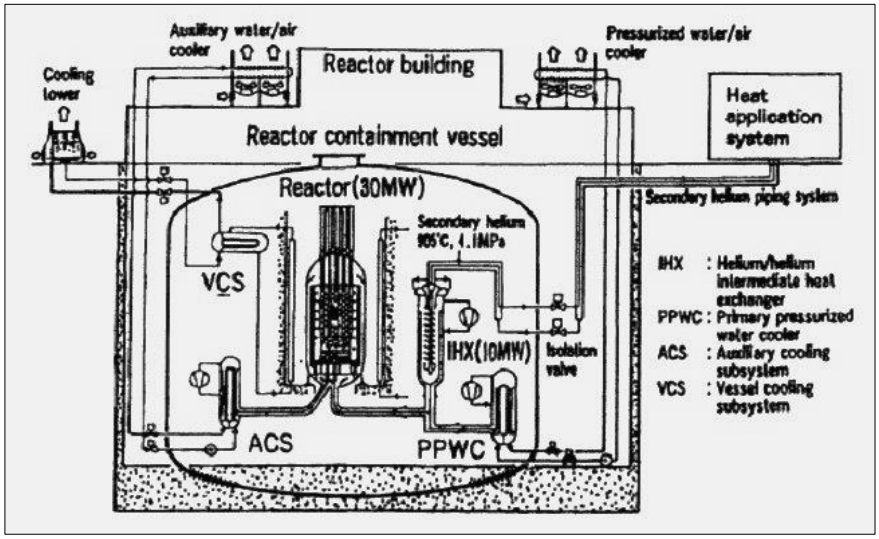

Figura 3

Lo schema semplificato del sistema è riportato nella seguente Figura 3.

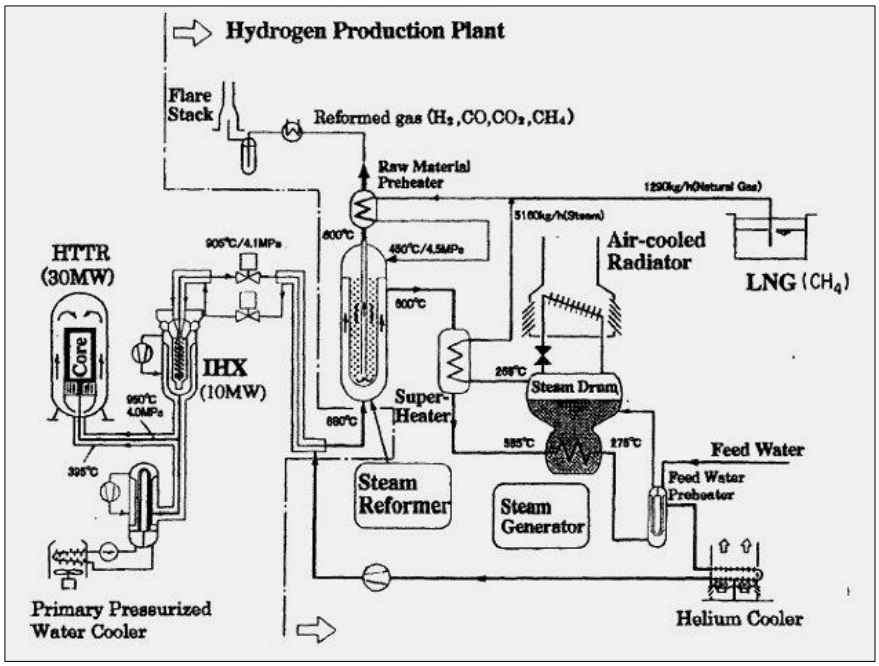

Figura 4

I parametri del sistema sono riportati nella Figura 4 (diagramma di flusso del processo di steam reforming accoppiato al reattore HTTR) e nella tab. 1.

Secondary helium	
Flow rate	9070kg/h
Temperature	
Outlet/Inlet of the IHX	905°C/160°C
Outlet/Inlet of the SR	880°C /600°C
Outlet/Inlet of the SG	555°C /275°C
Pressure	4.1MPa

Process feed gas	
Flow rate	6450kg/h
Composition	
CH_4	17.7 mol%
C_2H_6	1.2 mol%
C_3H_8	0.6 mol%
C_4H_{10}	0.3 mol%
H_2O	80.2 mol%
Pressure	4.5MPa

Product gas	
Composition	
H_2	38.7 mol%
CO	4.5 mol%
CO_2	5.7 mol%
CH_4	5.1 mol%
H_2O	46.0 mol%
Pressure	4.1MPa

Tabella 1

Copyright © ADEPRON Tutti i Diritti Riservati - www.adepron.it

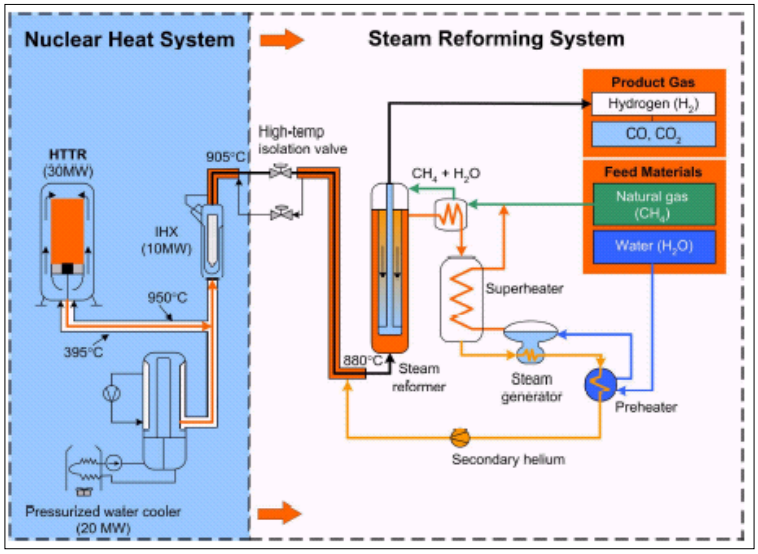

Figura 5

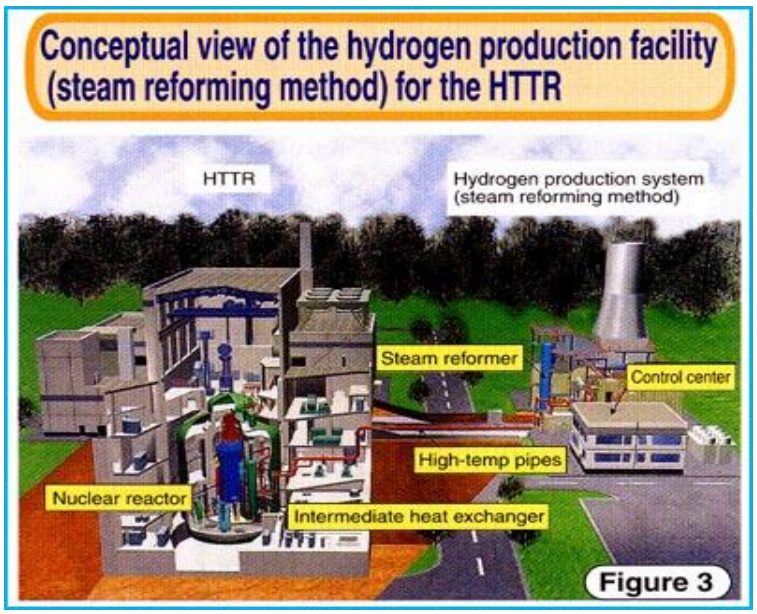

Figura 6

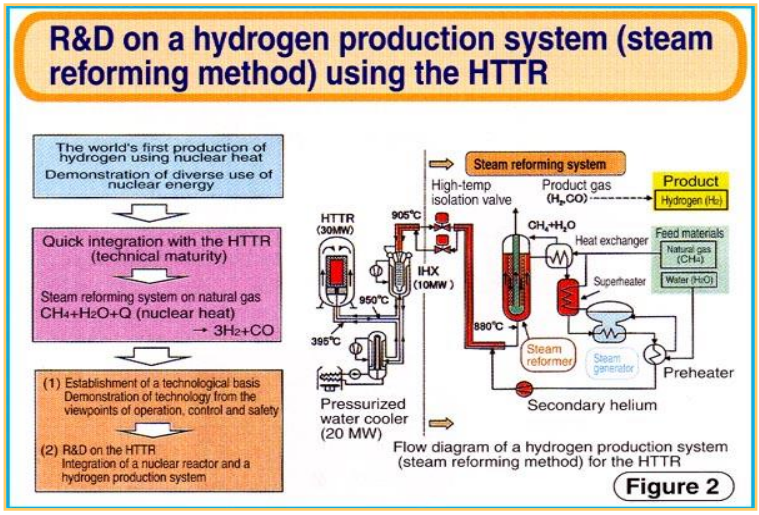

Figura 7

Questo sarà probabilmente il primo fra i primi processi con cui il calore di origine nucleare verrà utilizzato per produrre idrogeno, essendo questa tecnologia ormai ben conosciuta e collaudata. Questo processo su scala industriale richiede temperature dell'ordine degli 800°C e pressioni di 2.5 MPa, con rendimenti variabili dal 50% al 70% (In realtà la reazione si innesca già a temperature dell'ordine di 620 °C, ma la cinetica di quest'ultima migliora all'aumentare della temperatura.
D'altro canto esistono delle limitazioni sulla temperatura massima legate alle caratteristiche meccaniche dei materiali usati nel corso del processo stesso. Pertanto l'attuale punto di equilibrio fra le due opposte esigenze si colloca intorno agli 800°C).
Nella Figura 5, Figura 6 e Figura 7 sono riportati alcuni schemi di produzione dell'idrogeno per Steam Reforming mediante il reattore HTTR.

Copyright © ADEPRON Tutti i Diritti Riservati - www.adepron.it

Nella Tabella 2 è rappresentato un confronto tra le condizioni operative del processo di reforming di produzione dell'idrogeno nel campo convenzionale a combustibile fossile e nel sistema nucleare HTTR

Caratteristica di processo	Sistema a combustibile fossile	Sistema nucleare HTTR
Pressione del gas naturale	Da 1 a 3 MPa	4.5 MPa all'ingresso del reformer
Temperatura massima del gas naturale	850 fino a 900°C	800°C
Flusso termico massimo nella zona del catalizzatore	50 fino a 80 kw/m^2	40 KW/m^2
Utilizzazione dell'energia termica nel reformer	80 fino a 85%	78%
Emissione di CO_2 dalla fonte di calore per energia generata	3 ton CO_2/h/10MW	0

Tabella 2

Nella Figura 8a e Figura 8b sono rappresentati alcuni esempi di reformer per gli impianti HTR.

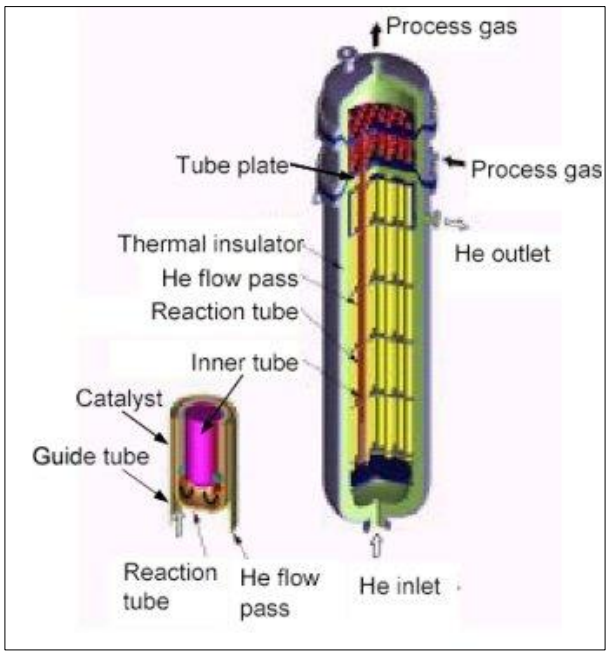

Figura 8a

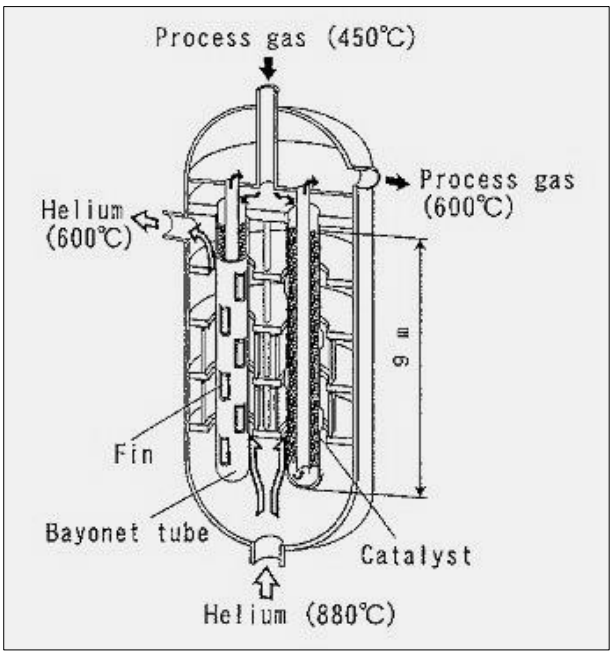

Figura 8b

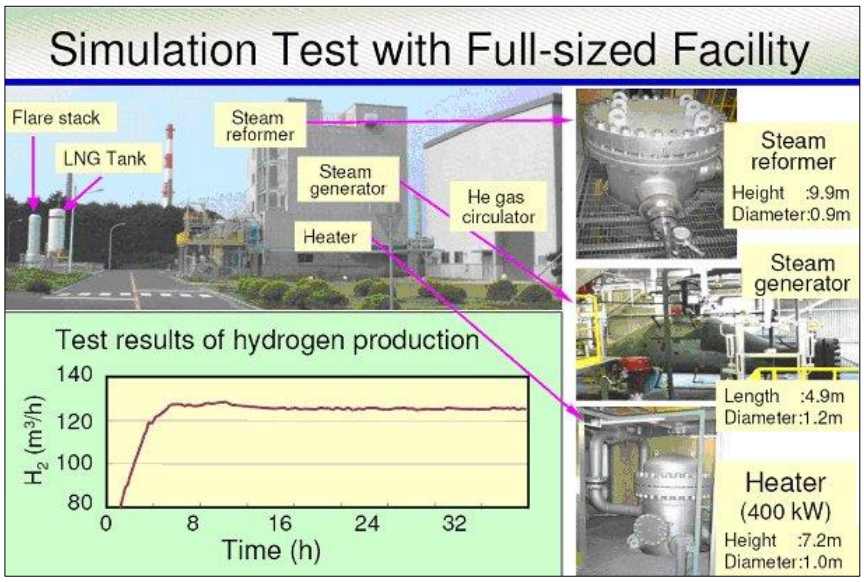

Figura 9

Nella Figura 9 seguente sono rappresentati i risultati dei test in termini di produzione oraria di idrogeno nell'impianto sperimentale della JAERI.

Copyright © ADEPRON Tutti i Diritti Riservati - www.adepron.it

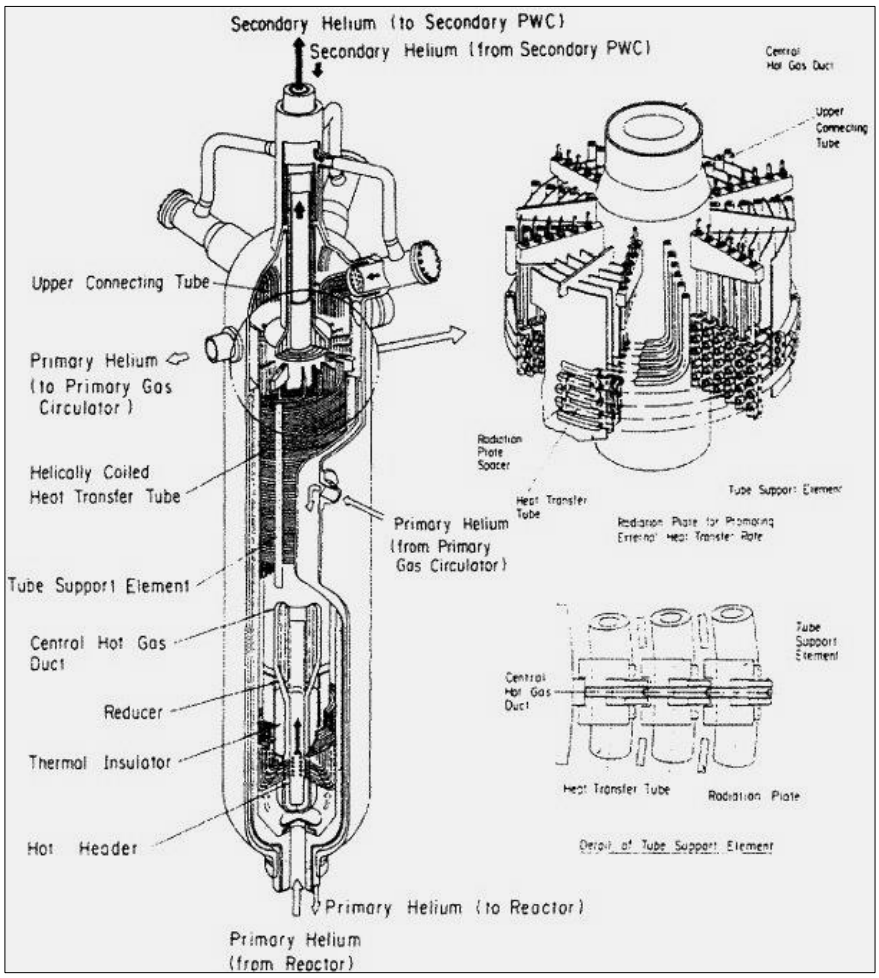

Figura 10

In tutti i processi di produzione industriale dell'idrogeno che presuppongano l'utilizzo di impianti chimici associati a quelli nucleari, appare opportuna la separazione degli stessi. L'idea di fondo è quella di disaccoppiare l'impianto chimico da quello nucleare, per motivi di sicurezza (contaminazione dell'idrogeno con sostanze radioattive, in particolare il tritio, e penetrazione di agenti corrosivi all'interno del reattore nucleare), attraverso l'uso di uno scambiatore di calore intermedio (IHX, Intermediate Heat Exchanger), (Figura 10).

Il fluido vettore più usato è l'elio, ma in linea di principio si potrebbero utilizzare anche CO_2, Ar, Ne, N_2, vapore. L'utilizzo di questo componente consente pertanto di:

- *minimizzare la contaminazione della parte chimica (che può pertanto essere posta all'esterno del contenimento del reattore);*
- *prevenire l'ingresso di acqua e/o gas di processo nel nocciolo in caso di rottura delle tubazioni di scambio;*
- *ridurre i fenomeni di permeazione dell'idrogeno nell'elio del circuito primario e del tritio nella direzione inversa.*

Dal punto di vista meccanico-strutturale le pareti dell'IHX dovrebbero essere realizzate con materiali che resistano molto bene alle alte temperature. Inoltre tali materiali dovrebbero presentare buone caratteristiche di resistenza al creep ed alla fatica, così come un'adeguata resistenza all'insorgenza di fenomeni di instabilità elastica. Le tensioni primarie e secondarie in tale tipo di componenti dovrebbero essere mantenute quanto più basse possibile. Fra le leghe commercialmente disponibili rispondenti a tali particolari specifiche (INCONEL 617, lega a base di Ni-Cr-Co-Mo tipicamente utilizzata nelle turbine a gas – HASTELLOY X, ega a base di Ni-Cr-Mo sviluppata per l'utilizzo nelle turbine a gas – INCOLOY 800H, lega a base di Fe-Ni-Cr utilizzata per i generatori di vapore in campo nucleare) quella che maggiormente si presta all'utilizzo prolungato nel tempo previsto (~100.000 ore) è risultata essere l'INCONEL 617.

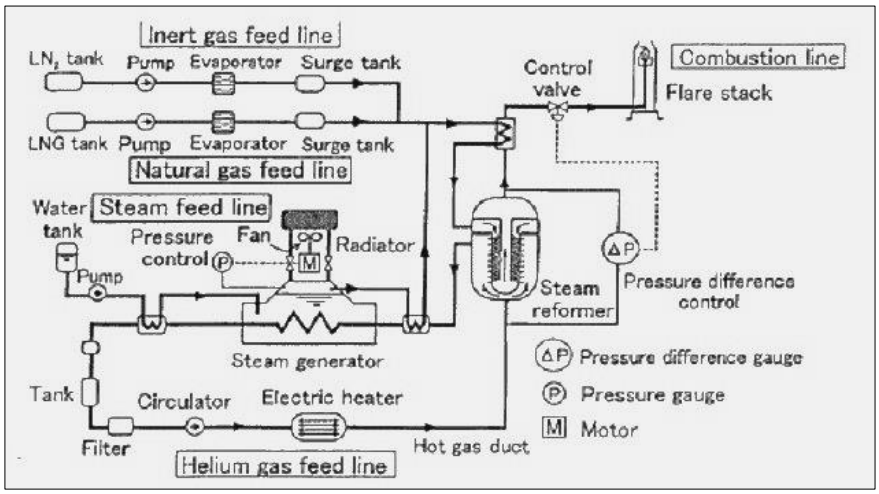

Figura 11

Visto l'alto costo di tale lega e le elevate temperature in gioco, è in corso lo sviluppo di nuovi materiali, per lo più ceramici.

Occorre comunque tener presente che la JAERI ha effettuato solo un test in scala 1:30, simulando la parte nucleare dell'impianto con un riscaldatore elettrico da 380kW per portare l'elio del circuito secondario fino a 880°C. Uno schema semplificato dell'apparato di prova è riportato in Figura 11.

Copyright © ADEPRON Tutti i Diritti Riservati - www.adepron.it

ANALISI PRELIMINARE DI SICUREZZA DELLA PRODUZIONE DI H_2 CON IL REATTORE HTTR

Ai fini dell'effettuazione di un'analisi preliminare di sicurezza, si è preferito usare una metodologia FMEA piuttosto che HAZOP sostanzialmente per due motivi:

- *non tutti i dati necessari allo svolgimento di un'analisi HAZOP erano disponibili e/o reperibili;*
- *l'unico apparato fino ad oggi realmente costruito e funzionante ha il carattere di test di laboratorio, pertanto:*
  - *le dimensioni delle apparecchiature nonché le quantità di sostanze pericolose implicate nel processo risultano essere piuttosto ridotte;*
  - *i risultati ottenuti dall'analisi sarebbero risultati essere sostanzialmente inapplicabili per apparati analoghi ma di dimensioni maggiori (al contrario di quanto avviene per un'analisi più qualitativa di tipo FMEA).*

I più significativi (dal punto di vista del rischio potenziale) risultati dell'analisi FMEA effettuata sull'impianto sperimentale della JAERI per la produzione di H2 mediante Steam Reforming sono riportati nella successiva Tabella 3.

Componente	Modo di guasto	Effetti sul sistema	Effetti su altri componenti	Classe	Manifestazione del guasto
Alimentazione del calore (impianto HTR)	Interruzione del collegamento o malfunzionamento del reattore	Degrado del processo produttivo	Malfunzionamento dello steam reformer Mancata produzione di vapore con caratteristiche adeguate al processo.	III	Diminuzione della temperatura dell'elio nel circuito secondario
Pompa CH_4	Incapacità di fornire la prevalenza al fluido	Degrado del processo produttivo	Variazione dei parametri di processo nello steam reformer	II	Diminuzione di pressione di alimentazione del gas di alimento
Serbatoio e linea alimento CH_4	Rottura e perdite	Formazione di una nube potenzialmente esplosiva nella parte chimica convenzionale dell'impianto	Mancata alimentazione del gas di processo nello Steam Reformer	IV	Presenza di una pozza/nube di CH4. Rivelatori di gas.
Scambiatore CH_4/ gas prodotti	Perdita/rottura dell'interfaccia	Possibile contaminazione dei gas di processo con CH^4	Degrado del processo produttivo e della qualità del prodotto finale	III	Presenza di CH4 nel gas prodotto
Pompa H_2O	Incapacità di fornire la prevalenza al fluido	Variazione della qualità di H_2O allo SG	Nessuno	II	Diminuzione della pressione dell'H_2O
Linea alimento H_2O	Perdita o rottura	Mancata alimentazione di H20 allo scambiatore H2O/He e allo SG	Possibile surriscaldamento del bundle dello scambiatore.	II	Presenza di pozze d'acqua.
Scambiatore H_2O/He	Perdita/rottura dell'interfaccia	Perdita di pressione del circuito secondario dell'elio.	Perdita di uno dei sistema di refrigerazione del circuito primario	IV	Diminuzione di pressione dell'He.
Circuito secondario He	Perdita	Perdita di pressione del circuito secondario dell'elio.	Perdita di uno dei sistema di refrigerazione del circuito primario	IV	Diminuzione di pressione dell'He.
Generatore di vapore	Perdita	Mancata produzione di vapore con caratteristiche adeguate	Degrado del processo produttivo e della qualità del prodotto finale	III	Perdite di H_2O o vapore
Radiatore	Perdita dell'alimentazione elettrica/guasto tecnico	Nessuno in caso di normale funzionamento	Possibile surriscaldamento della linea dell'H2O	III	Mancato funzionamento su chiamata
Surriscaldatore	Perdita/rottura bundle	Degrado del processo produttivo	Possibile presenza di He nel circuito dell'H2O e perdita di pressione nel secondario dll'He.	IV	Diminuzione di pressione dell'He.
Steam Reformer	Perdita	Degrado del processo produttivo	Possibili contaminazioni dei circuiti interessati	III	Degrado nella qualità dei gas prodotto
Compressore He	Incapacità di fornire la prevalenza al fluido	Perdita di pressione del circuito secondario dell'elio.	Perdita di uno dei sistema di refrigerazione del circuito primario	IV	Diminuzione di pressione dell'He

Tabella 3

Copyright © ADEPRON Tutti i Diritti Riservati - www.adepron.it

Da questa preliminare analisi emergono alcune considerazione significative:

- Le uniche ripercussioni di un mancato funzionamento della parte chimica su quella nucleare derivano da eventuali malfunzionamenti o incidenti sul circuito dell'He secondario. In questa caso, infatti, è previsto una procedura di spegnimento di emergenza del reattore e l'interruzione del processo di produzione per salvaguardare l'integrità strutturale dei componenti, in particolare dello Steam Reformer.

- Non ci sono invece ripercussioni in caso di malfunzionamento o incidente sulla linea di alimentazione del gas di processo o su quella del vapore. In questo caso infatti è possibile refrigerare ugualmente l'He nel secondario tramite lo SG e lo scambiatore collegato. E' possibile quindi procedere con lo spegnimento del reattore secondo la normale procedura e non in emergenza.

- Considerando la complessità dello schema di processo per la produzione di H_2 e le condizioni chimiche e fisiche (ambienti aggressivi e alte temperature) è lecito attendersi che sia molto più probabile un malfunzionamento della linea di produzione dell'H_2 piuttosto che della linea di produzione del calore. In questo caso occorre provvedere affinché un tale inconveniente non si traduca automaticamente in uno shutdown del reattore. Lo SG ed il cooler ad aria associato rappresentano una soluzione progettuale ingegnosa. Oltre alla produzione del vapore necessario al processo di reforming, consentono di controllare la temperatura dell'He nel secondario e la sua refrigerazione anche in caso di malfunzionamento della linea del CH_4 o dello SR.

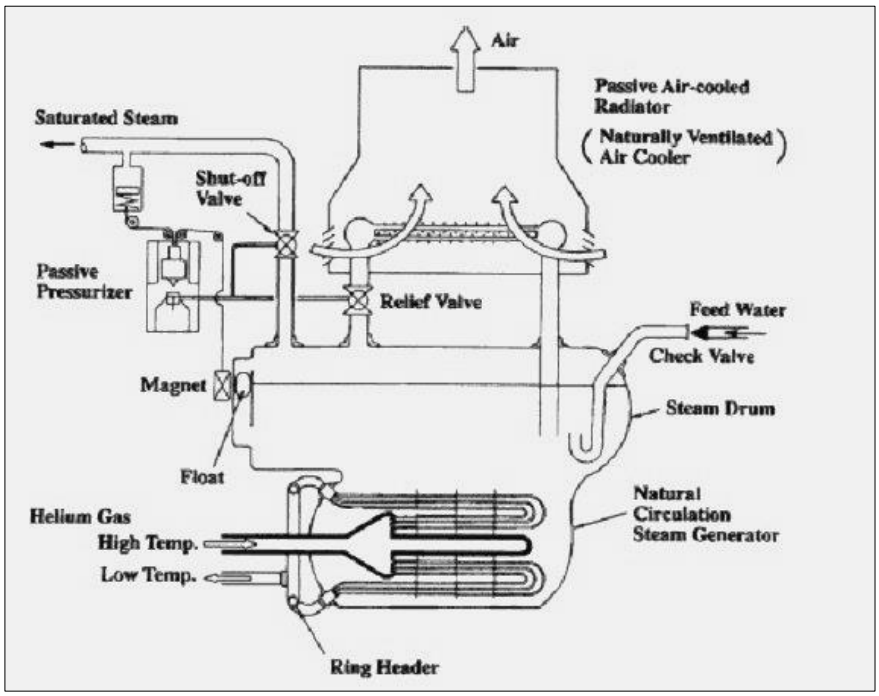

Figura 12

Infatti anche se dovesse essere sospesa l'alimentazione del vapore verso lo SR è possibile comunque continuare a refrigerare l'He.
In questo caso il vapore prodotto viene inviato al cooler ad aria che lo condensa e lo reimmette nello SG. Stessa soluzione può essere adottata in caso di mancata alimentazioni di acqua: viene sospesa l'alimentazione di vapore allo SR e il vapore prodotto serve solo a refrigerare l'He. La circolazione in questa caso avviene per convezione naturale tra SG e cooler. Nella seguente Figura 12 sono rappresentati gli elementi più importanti di questo sistema.

- La tecnologia della parte "convenzionale" del sistema di produzione di H_2 mediante Steam Reforming è ben conosciuta e sperimentata a livello industriale (il 48% dell'idrogeno a livello mondiale è prodotto con questo processo), ma occorre che alcuni aspetti relativi alla connessione tra parte nucleare e parte chimica dell'impianto siano investigati a fondo prima che il processo possa essere applicabile, tecnicamente sicuro ed economicamente competitivo.

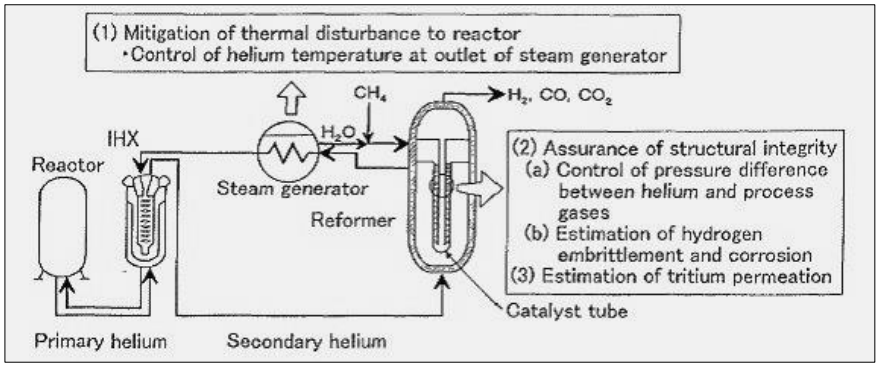

Figura 13

I principali campi di indagine per la gestione sicura del sistema sono riassunti nella Figura 13 e di seguito brevemente esposti.

Copyright © ADEPRON Tutti i Diritti Riservati - www.adepron.it

1) Mitigazione dei disturbi termici al reattore: la soluzione adottata dalla JAERI per limitare tale fenomeno nel reattore HTTR consiste nell'utilizzo del vapore fornito dallo SG come stabilizzatore della temperatura di ingresso dell'elio secondario nell'IHX. Anche in caso di disturbi termici legati a malfunzionamenti nella linea di reforming, la temperatura dell'elio all'uscita dello SG può essere mantenuta costante alla temperatura di saturazione del vapore attraverso la regolazione della pressione. Può succedere che il reattore sia fermato in accordo alle normali operazioni di spegnimento, ma non che capiti a causa dei disturbi termici legati a malfunzionamenti o incidenti, poiché lo SG agisce da assorbitore di questi ultimi. Si cerca di limitare la fluttuazione della temperatura entro i 10°C all'uscita dello SG, poiché aumenti della temperatura dell'ordine dei 15°C causerebbero lo shutdown del reattore HTTR.

2) L'assicurazione dell'integrità strutturale del tubo catalitico: il controllo della pressione differenziale fra l'elio e i gas di processo, e la stima dell'infragilimento da idrogeno e corrosione sono tra le possibili soluzioni di questo problema.

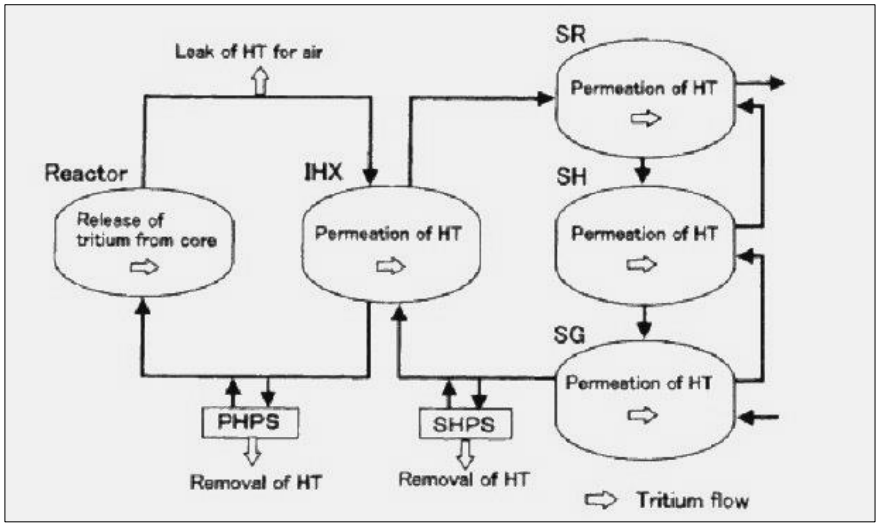

Figura 14

Case	Calculation condition: Tube surface IHX	Tube surface SR,SH,SG	Purification rate (kg/h)	Hydrogen release	Tritium concentration in product hydrogen (–)	(Bq/g)
1	Clean	Clean	200	no	1.67×10^{-13}	89.5
2	Clean	Oxidized	200	no	3.83×10^{-14}	20.5
3	Coated	Oxidized	200	no	1.66×10^{-14}	8.86
4	Defect	Oxidized	200	no	2.25×10^{-14}	12.0
5	Coated	Oxidized	400	no	9.96×10^{-15}	5.33
6	Clean	Oxidized	800	no	1.59×10^{-14}	8.50
7	Coated	Oxidized	200	Release	1.27×10^{-14}	6.80

Tabella 4

3) Stima della permeazione del tritio: affinché la produzione per via nucleare dell'idrogeno possa essere considerata una credibile alternativa a quello per via fossile, è necessario che l'idrogeno così prodotto non risulti contaminato dal tritio. Esistono due approcci per limitare efficacemente questa problematica: rimuovere quanto più tritio possibile dal refrigerante primario del reattore, oppure evitarne la permeazione attraverso le tubazioni di scambio. Il rateo di quest'ultima dipende dalle condizioni superficiali delle tubazioni: se la superficie è pulita esso è elevato; al contrario in presenza di uno strato superficiale di ossido tale rateo tende a diminuire. Nella Figura 14 è riportata una rappresentazione dei possibili scambi di tritio tra sorgente (reattore) e sistemi coinvolti, nella Tabella 4 le concentrazioni calcolate del tritio nell'idrogeno prodotto in funzione dello stato delle superfici di scambio.

• Occorre considerare l'eventualità di incendi ed esplosioni a seguito della formazione di una nube di gas infiammabile come conseguenza di una perdita di idrogeno o metano. E' sostanzialmente questo il più importante fattore di rischio per gli operatori e la popolazione: risulta quindi necessario evitare e/o minimizzare il più possibile le conseguenze di eventuali incidenti che comportino perdite nelle tubazione che trasportano il gas. Inoltre una eventuale esplosione potrebbe danneggiare le strutture dell'impianto e comprometterne la sicurezza. Occorre considerare 3 possibili casi:

I all'interno dell'edificio reattore;
II all'esterno ma in prossimità dell'edificio reattore;
III all'esterno e lontano dall'edificio reattore.

Nel primo caso le conseguenze di una esplosione potrebbero essere molto gravi e tali da compromettere la sicurezza nucleare del reattore. Occorre intervenire affinché la probabilità di un evento di questo tipo sia ragionevolmente bassa. L'analisi del sistema evidenzia come l'unico caso in cui ci possa essere trasferimento di gas esplosivi dal sistema convenzionale all'interno del reattore sia la contemporanea rottura del circuito dell'elio secondario e dello Steam Reformer. Questo può succedere solo in caso di sisma ed è per questo che il sistema deve essere progettato per avere elevati standard di sicurezza contro le conseguenze di tale evento.
Il sistema di Steam Reforming non è progettato come sistema nucleare e non possiede gli stessi livelli di sicurezza. In caso di esplosione in questa sezione, che è comunque vicina al reattore, potrebbero generarsi carichi termici e onde di

Copyright © ADEPRON Tutti i Diritti Riservati - www.adepron.it

sovrapressione tali da pregiudicare l'integrità dell'edificio reattore. Occorre quindi limitare il rischio di perdite di gas infiammabile nei pressi del reattore, ad esempio adottando come soluzione per il trasporto del gas un tubo doppio come quelli usati per il trasporto dei gas tossici.

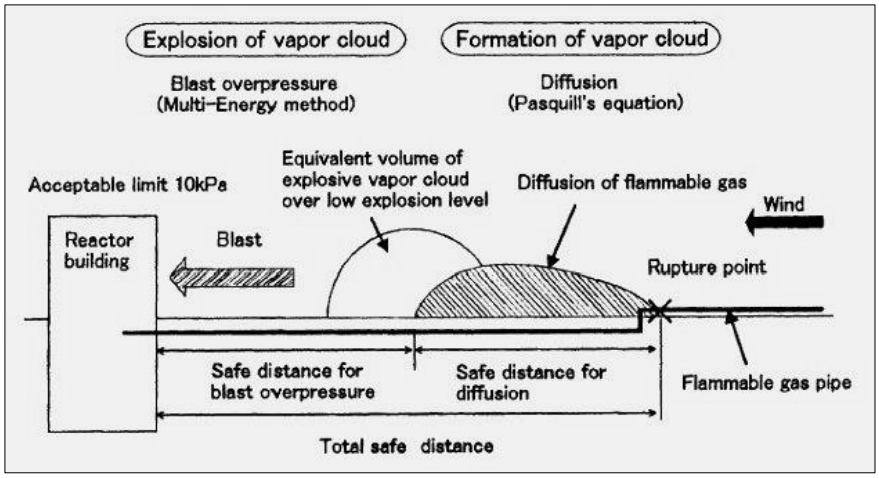

Figura 15

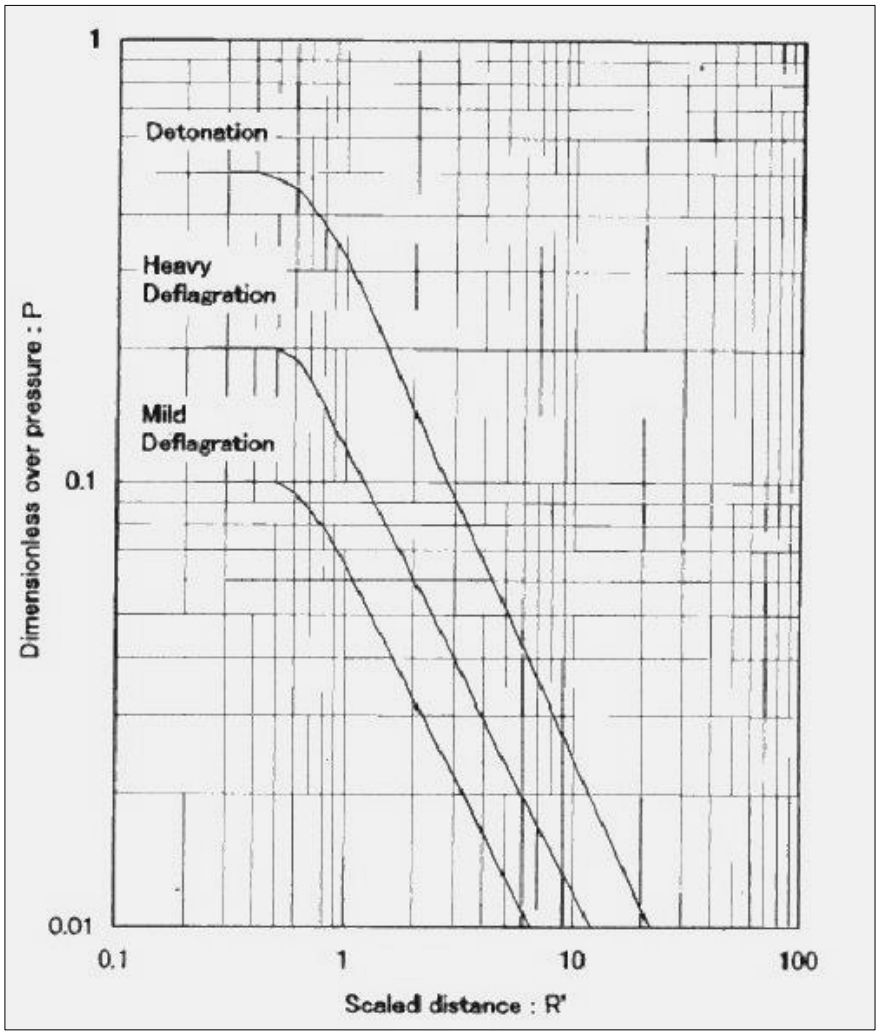

Figura 16

In caso di evento lontano dal reattore gli effetti dell'esplosione potrebbero essere più significativi di quelli dell'incendio.
É quindi necessario valutare la distanza di sicurezza nei confronti di questo evento. Se usiamo il modello del TNT equivalente, il modello di formazione della nube e di esplosione riportato in Figura 15 e la distanza scalata ricavata dal grafico in Figura 16 possiamo calcolare la distanza di sicurezza. Ipotizzando di avere una massa di 100 kg di gas con un potere calorifico pari a $3.5 \cdot 10^6$ J/m^3 si ottiene una distanza di sicurezza di circa 200 m.

Copyright © ADEPRON Tutti i Diritti Riservati - www.adepron.it

CONCLUSIONI E PROSPETTIVE FUTURE

In conclusione già per un impianto sperimentale di piccola taglia come quello preso in considerazione esistono sequenze incidentali potenzialmente pericolose di cui tener debito conto nella fase di progettazione dei sistemi di sicurezza; tali problematiche risulteranno essere inevitabilmente accentuate per impianti di taglia maggiore, ed ancora più sentite per impianti di natura non sperimentale ma commerciale. I risultati ottenuti in questo lavoro possono fornire alcune indicazioni riguardo ai componenti più "critici" ed alle sequenze incidentali più rischiose.
In futuro sarà quindi necessario un ulteriore impegno nel campo della ricerca e dello sviluppo per giungere a sistemi di produzione per via nucleare economicamente e tecnicamente competitivi. L'affermarsi di questa tecnologia, se si tengono ben presenti i suoi limiti intrinseci (l'idrogeno è un vettore energetico e non una fonte di energia e quindi deve essere prodotto industrialmente), è sicuramente una delle più affascinanti e stimolanti prospettive nell'ottica di uno sviluppo della nostra società veramente sostenibile sia dal punto di vista ambientale che sociale.

BIBLIOGRAFIA

[1] G. Lomonaco – *Problematiche di sicurezza nella produzione di idrogeno mediante impianti HTR* – Tesi di laurea in Ingegneria della Sicurezza Industriale e Nucleare – relatori prof. N. Cerullo, prof. M. Carcassi – Università di Pisa – Dicembre 2003 – http://www.tesionline.it/default/tesi.asp?idt=10361

[2] A. Franco – *Fonti convenzionali e fonti alternative di energia: applicazioni nei paesi in via di sviluppo* – presentato alla conferenza "Risorse Energetiche Sostenibili" – Pisa, Novembre 2003

[3] V. Romanello – *Analisi di alcune peculiari potenzialità degli HTR: la produzione di idrogeno ed il bruciamento degli attinidi* – Tesi di laurea in Ingegneria Nucleare – relatori prof. N. Cerullo, prof. G. Forasassi, prof. B. Montagnini, ing. G. Lomonaco – Università di Pisa – Ottobre 2003 – http://etd.adm.unipi.it/theses/available/etd-10152003-181233/

[4] G. Lomonaco – *Le fonti primarie per la produzione energetica: stato dell'arte e problematiche* – presentato alla conferenza "Risorse Energetiche Sostenibili" – Pisa, Novembre 2003

[5] A. Marangon – *Prospettive e problematiche dell'idrogeno come vettore energetico* – presentato alla conferenza "Risorse Energetiche Sostenibili" – Pisa, Novembre 2003

[6] G. Lomonaco – *I recenti sviluppi dei reattori a gas ad alta temperatura. La collocazione di questi impianti nel futuro piano energetico mondiale. Il programma europeo HTR-N e l'attività di ricerca del DIMNP svolta nel suo ambito.* – Tesi di laurea in Ingegneria Nucleare – relatori prof. N. Cerullo, prof. G. Forasassi, prof. B. Montagnini – Università di Pisa – Giugno 2003 – http://www.tesionline.it/default/tesi.asp?idt=10251

[7] Hydrogen as an energy carrier and its production by nuclear power – IAEA TECDOC 1085 – Maggio 1999

[8] A. L. Dicks – *Hydrogen Generation from Natural Gas for the Fuel Cell Systems of Tomorrow* – Journal of Power Sources n. 61 pag. 113-124 – 1996

[9] K. Verfondern, H. Barnert, W. von Lensa – *The Production of Nuclear Hydrogen by means of Process Heat from HTGRs* – presentato alla conferenza "ICAP03" – Cordoba – Maggio 2003

[10] M. Ogawa, S. Shiozawa – *Evaluation of Hydrogen Production System with High Temperature Gas-cooled Reactor* – presentato alla conferenza "GENES4/ANP2003" – Settembre 2003

[11] K. R. Schultz, L. C. Brown, G. E. Besenbruch, C. J. Hamilton – *Production of Hydrogen by Nuclear Energy: The Enabling Technology for the Hydrogen Economy* – General Atomics

[12] S. Shiozawa et alii – *Nuclear Process Heat Utilization: Hydrogen Production* – presentato alla conferenza "HTR/ECS 2002" – Novembre 2002

[13] K. Schultz – *Efficient Production of Hydrogen from Nuclear Energy* – General Atomics – California Hydrogen Business Council – Giugno 2002

[14] *Design and evaluation of heat utilization systems for the high temperature engineering test reactor* – IAEA TECDOC 1236 – Agosto 2001

[15] *Safety related design and economic aspects of HTGRs* – IAEA TECDOC 1210 – Aprile 2001

[16] http://www.inisjp.jaeri.go.jp

[17] L. M. Crosbie, D. Chapin – *Hydrogen Production by Nuclear Heat* – presentato alla conferenza "GENES4/ANP20032 – Settembre 2003

[18] *Current status and future development of modular high temperature gas cooled reactor technology* – IAEA TECDOC 1198 – Febbraio 2001

[19] *High temperature gas cooled reactor technology development* – IAEA TECDOC 988 – Dicembre 1997

[20] M. G. Zabetakis, A. L. Furno, G. H. Martindell – *Explosion Hazards of Liquid Hydrogen* – Adv. Cryo. Eng. 6, pag. 185-194 – 1961

[21] C. M. Guirao, R. Knystautas, J. H. Lee – *A Summary of Hydrogen-Air Detonation Experiments* – Report NUREG/CR-4961, SAND87-7128 – Sandia National Laboratory – Albuquerque – 1989

Copyright © ADEPRON Tutti i Diritti Riservati - www.adepron.it

[22] M. Berman – *A Critical Review of Recent Large-Scale Experiments on Hydrogen-Air Detonations* – Nuclear Science Technology. n. 93, pag. 321-347 – 1986

[23] J. Singh et al. – *The Nuclear Heated Steam Reformer – Design and Semi-technical Operating Experiences, Nucl*. Engng. And Design 78 (1984), 179-194

[24] K. Kugeler, H. Barnert – *Application of the High Temperature Reactor in the Energy Economy*, IAEA-TECDOC-761, Vienna, (1993)

[25] K. Schultz – *Efficient Production of Hydrogen from Nuclear Energy* – General Atomics – California Hydrogen Business Council – Giugno 2002

[26] *Design and evaluation of heat utilization systems for the high temperature engineering test reactor* – IAEA TECDOC 1236 – Agosto 2001