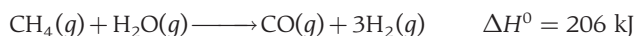


A causa della sovratensione (Paragrafo 21.5), il potenziale di cella è circa  $-2$  V. In condizioni operative tipiche, perciò, sono necessari circa 400 kJ di energia per produrre 1 mol di  $H_2$ .

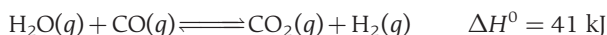
$$\Delta G = -nFE = (-2 \text{ mol } e^-) \left( \frac{96,5 \text{ kJ}}{\text{V} \cdot \text{mol } e^-} \right) (-2 \text{ V}) = 4 \times 10^2 \text{ kJ/mol } H_2$$

$O_2$  di elevata purezza è un prezioso sottoprodotto di questo processo che compensa parte del costo della produzione di  $H_2$ .

2. *Metodi termici.* I più comuni metodi termici utilizzano l'acqua e un semplice alcano come il metano che ha il più elevato rapporto H/C di tutti gli idrocarburi. I reagenti sono riscaldati a circa 1000 °C su un catalizzatore a base di nichel nel processo endotermico di *reforming del vapore (steam-reforming)*:



Il calore necessario viene fornito dalla combustione del metano. Per produrre una maggiore quantità di  $H_2$ , la miscela di prodotti (il gas d'acqua) viene riscaldato con vapore a 400 °C su un catalizzatore di ferro o cobalto nella reazione esotermica di *reazione di spostamento del gas d'acqua (water-gas shift reaction)* in cui il CO reagisce (vedi anche la scheda *La chimica nelle altre scienze*, Capitolo 6) secondo l'equazione:



La miscela di reazione viene riciclata numerose volte facendo diminuire la quantità di CO fino a circa 0,2% in volume. La miscela viene poi fatta passare attraverso acqua liquida che rimuove  $CO_2$  più solubile ( $S = 0,034$  mol/L) lasciando una maggiore quantità di  $H_2$  ( $S < 0,001$  mol/L). Anche l'ossido di calcio può essere utilizzato per rimuovere  $CO_2$  per formazione di  $CaCO_3$ . La rimozione di  $CO_2$  causa lo spostamento verso destra dei vari passaggi di equilibrio producendo  $H_2$  puro a circa il 98%. La miscela può essere filtrata attraverso *zeoliti sintetiche* per rimuovere le molecole più grandi di  $H_2$  e produrre idrogeno di maggiore purezza (~99,9%). Le zeoliti sono alluminosilicati la cui struttura è costituita da poliedri con piccole cavità di varie dimensioni che intrappolano alcune molecole e ne lasciano passare altre agendo come setacci molecolari.

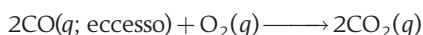
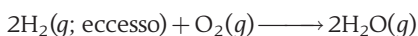
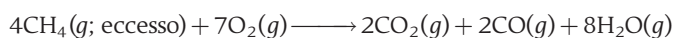
**Usi industriali dell'idrogeno** Solitamente, un impianto produce idrogeno per sintetizzare altri prodotti. Più del 95% dell'idrogeno prodotto viene utilizzato in impianti per la produzione di ammoniaca o petrolchimici.

1. *Sintesi dell'ammoniaca.* In un impianto per la produzione di  $NH_3$ , i gas reagenti,  $N_2$  e  $H_2$ , si formano in una serie di reazioni che usano metano. Di seguito viene descritta una tipica serie di reazioni che avvengono in un impianto per la produzione di ammoniaca.

- La reazione di reforming del vapore viene condotta con un eccesso di  $CH_4$  causando la diminuzione della concentrazione di  $H_2O$ :



- Un eccesso della miscela di prodotti ( $CH_4$ , CO e  $H_2$ ) viene bruciato con una quantità di aria ( $N_2 + O_2$ ) insufficiente per la combustione completa ma sufficiente per consumare  $O_2$ , scaldare la miscela a 1100 °C e formare ulteriore acqua:



- Il  $CH_4$  residuo reagisce secondo la reazione di reforming del vapore, il CO secondo quella di spostamento del gas d'acqua ( $H_2O + CO \rightleftharpoons CO_2 + H_2$ ) per formare altro  $H_2$  e, infine,  $CO_2$  viene rimosso con CaO ( $CaO + CO_2 \longrightarrow CaCO_3$ ).