



Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας



“Energy resources: Technologies & Management”

“Κελλία Καυσίμου”

Δρ. Γεώργιος Σκόδρας
Αν. Καθηγητής



Κελλία καυσίμου



- **Αρχές λειτουργίας των συστημάτων κελίων καυσίμου**
- **Κελλία καυσίμου φωσφορικού οξέος**
- **Κελλία καυσίμου τηγμένων ανθρακικών**
- **Κελλία καυσίμου στερεού οξειδίου**
- **Περιβαλλοντικά και οικονομικά θέματα**



Κελλία καυσίμου



Ένα κελλίο καυσίμου είναι ένα **ηλεκτροχημικό στοιχείο**, που λειτουργεί σαν ένας συσσωρευτής που φορτίζεται συνέχεια, ο οποίος μπορεί να μετατρέπει άμεσα την χημική ενέργεια ενός καυσίμου και ενός οξειδωτικού μέσου σε ηλεκτρική ενέργεια, με μία διεργασία που περιλαμβάνει ένα σύστημα ηλεκτροδίου-ηλεκτρολύτη, το οποίο παραμένει ουσιαστικά αμετάβλητο.

Η μέθοδος αυτή αποφεύγει τους περιορισμούς αποδοτικότητας των μηχανών θερμικής ενέργειας οι οποίοι απορρέουν από τον κύκλο του Carnot και μπορεί θεωρητικά να μετατρέψει το 80% της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια. Στην πράξη, μπορεί να επιτευχθεί αποδοτικότητα 60%.



Κελλία καυσίμου



Παρά την υψηλή τους αποδοτικότητα και τα χαμηλά επίπεδα εκπομπών, τα συστήματα ισχύος κελλίου καυσίμου έχουν ορισμένα εγγενή χαρακτηριστικά, τα οποία τα καθιστούν προτιμητέα για παραγωγή ισχύος στο μέλλον, σε σύγκριση με συστήματα τα οποία βασίζονται κύρια σε περιστρεφόμενες μηχανές που χρησιμοποιούν θερμομηχανικές διεργασίες.

Τα πιο σημαντικά από τα χαρακτηριστικά αυτά είναι η ικανότητά τους να παρακολουθούν τις μεταβολές του φορτίου, η δυνατότητα συναρμολόγησής τους από υπο-μονάδες, η οποία τους επιτρέπει να κατασκευασθούν έτσι ώστε να καλύψουν ένα μεγάλο εύρος απαιτούμενων μεγεθών ισχύος τα οποία κυμαίνονται από μερικές εκατοντάδες watts μέχρι και megawatts, καθώς και το γεγονός ότι είναι δυνατή η εγκατάστασή τους σε αποδεκτά σημεία εντός πυκνοκατοικημένων αστικών περιοχών, λόγω της συμμόρφωσής τους στα περιβαλλοντικά κριτήρια.



Κελλία καυσίμου



Τα κελλία καυσίμου προορίζονται για εφαρμογές όπως

- ✓ η παραγωγή ισχύος πολλών MW,
- ✓ η συμπαραγωγή,
- ✓ η χρησιμοποίηση βιομηχανικών αποβλήτων, ή
- ✓ η παραγωγή ισχύος σε έκτακτες περιπτώσεις.

Όσον αφορά στην χαμηλή κλίμακα παραγωγής ισχύος, τα κελλία καυσίμου αναπτύσσονται τόσο για τις ανάγκες **κίνησης ηλεκτρικών οχημάτων**, όσο και για στρατιωτικούς σκοπούς. Αν αποδίδουν με σχετικά χαμηλό κόστος, μπορούν να παίξουν ένα σημαντικό ρόλο σε όλους τους τομείς κατανάλωσης ενέργειας.



Κελλία καυσίμου



Αρχές λειτουργίας συστημάτων κελλίων καυσίμου

Ένα κελλίο καυσίμου μετατρέπει την χημική ενέργεια ενός πλούσιου σε υδρογόνο καυσίμου (π.χ. αερίου σύνθεσης, αναμορφωμένου φυσικού αερίου ή αναμορφωμένου αποστάγματος καυσίμου) και ενός οξειδωτικού μέσου, απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια.

Η κατασκευή του είναι παρόμοια με αυτήν του ξηρού συσσωρευτή, όμως, σε αντίθεση με αυτόν, δεν υπόκειται σε αλλαγές μάζας και κατά συνέπεια λειτουργεί για όσο χρόνο του παρέχονται αντιδρώντα, χωρίς να χρειάζεται επαναφόρτιση.



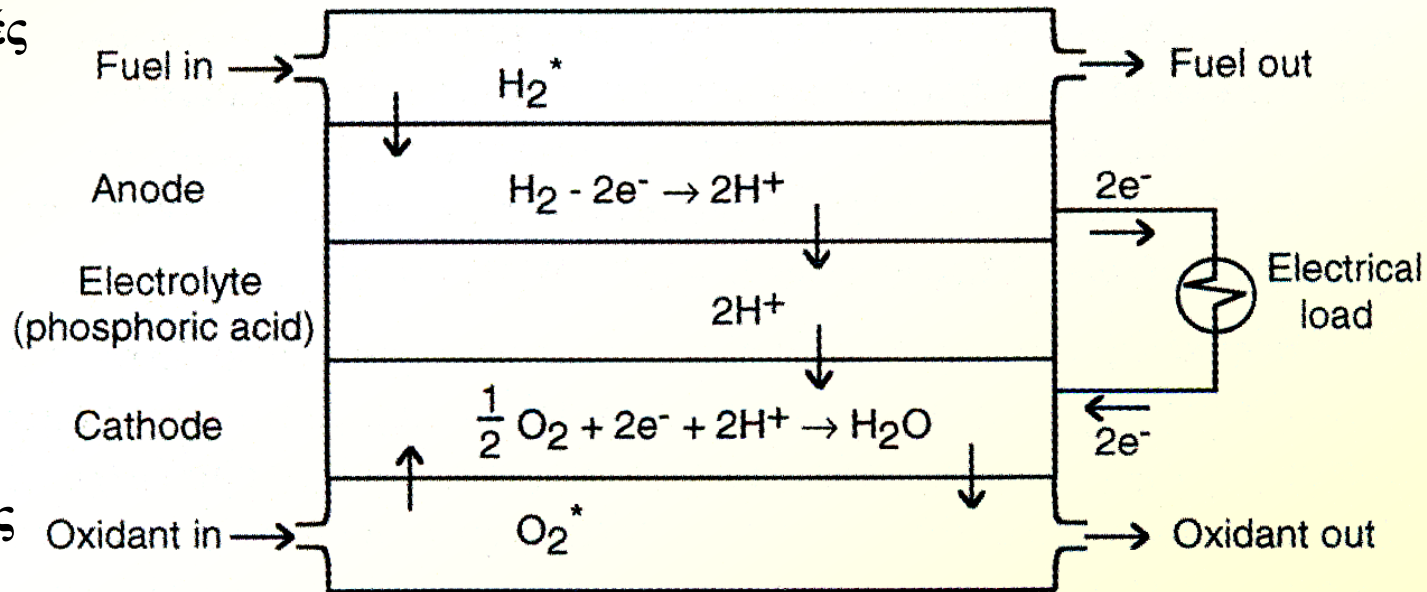
Κελλία καυσίμου

Αρχές λειτουργίας συστημάτων κελλίων καυσίμου

Σε ένα τυπικό κελλίο καυσίμου, δύο ηλεκτρόδια βρίσκονται σε επαφή με έναν ηλεκτρολύτη (π.χ. φωσφορικό οξύ, τηγμένα ανθρακικά ή στερεά οξείδια).

Το καύσιμο και το οξειδωτικό μέσο τροφοδοτούνται συνεχώς και ξεχωριστά στην άνοδο και στην κάθοδο, περιοχές δηλαδή ηλεκτροχημικών αντιδράσεων, οι οποίες εκλύουν ή απορροφούν ηλεκτρόνια.

Ο ηλεκτρολύτης αυτός αποτελεί μέσο μεταφοράς των ιόντων.



* Could be in mixtures of different gas species.

Όταν ένα εξωτερικό φορτίο συνδέεται με τα ηλεκτρόδια, τα ηλεκτρόνια ρέουν μέσω του φορτίου, παράγοντας έργο.



Κελλία καυσίμου



Αρχές λειτουργίας συστημάτων κελλίων καυσίμου

Το κελλίο καυσίμου παράγει υψηλό ρεύμα και χαμηλή τάση. Στην πράξη, χρήσιμες τάσεις παράγονται με την σύνδεση πολλών μεμονωμένων στοιχείων σε μία συστοιχία κελλίων καυσίμου.

Το κελλίο καυσίμου παράγει συνεχές ρεύμα (ισχύς DC), που απαιτεί συνήθως μία μονάδα προετοιμασίας ισχύος (εναλλάκτης), για την μετατροπή του παραγόμενου συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο ρεύμα (ισχύς AC).

Επειδή σε ένα κελλίο καυσίμου ο ηλεκτρισμός παράγεται απευθείας, αντί να περνά από ένα ενδιάμεσο βήμα μετατροπής (π.χ. καυστήρα, λέβητα, στρόβιλο, γεννήτρια), επιτυγχάνεται **υψηλό επίπεδο μετατροπής ενέργειας, 40- 60%**. Αυτό μπορεί να αυξηθεί μέχρι και μία τιμή του ύψους του 80%, αν χρησιμοποιηθεί και η θερμότητα της ηλεκτροχημικής αντίδρασης για θέρμανση χώρων, ύδατος ή βιομηχανικής χρήσης.



Κελλία καυσίμου

Αρχές λειτουργίας συστημάτων κελλίων καυσίμου

Ένα αντιπροσωπευτικό κελλίο καυσίμου, μίας μονάδας παραγωγής ισχύος, θα περιελάμβανε μία **διεργασία μετατροπής καυσίμου** (αεριοποιητή για την περίπτωση των ανθράκων, αναμορφωτή για το μεθάνιο ή τη νάφθα), **ένα κελλίο καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρισμού** (συνεχούς ρεύματος),

ένα **τμήμα επεξεργασίας**

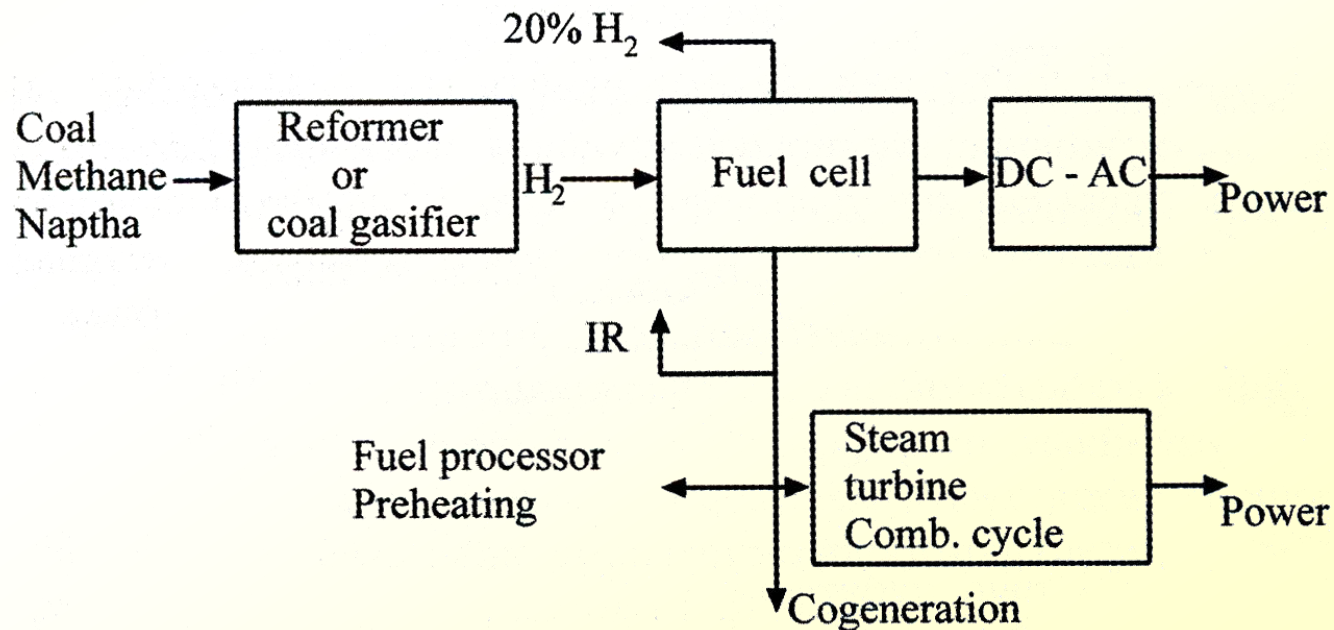
της ισχύος για μετατροπή

της ισχύος DC σε

εναλλασσόμενο ρεύμα

και ένα σύστημα

ανάκτησης θερμότητας.



Σχηματική αναπαράσταση μονάδας στοιχείου καυσίμου



Κελλία καυσίμου



Αρχές λειτουργίας συστημάτων κελλίων καυσίμου

Σε μονάδες που χρησιμοποιούν άνθρακα, η μετατροπή του άνθρακα είτε σε ένα πλούσιο σε υδρογόνο αέριο καύσιμο, είτε σε αέριο καύσιμο το οποίο μπορεί άμεσα να αναμορφωθεί σε υδρογόνο, είναι ένα ουσιαστικό βήμα. Η αεριοποίηση πρέπει να ακολουθείται από καθαρισμό του αερίου, σε επίπεδο τέτοιο που να ικανοποιεί τους κανονισμούς περιβάλλοντος.

Η αποδοτικότητα του κελλίου καυσίμου επηρεάζεται αντίστροφα από την αραιώση του καυσίμου της. Όσο πιο αραιωμένο είναι το καύσιμο, τόσο χαμηλότερη είναι η μέγιστη τάση του κελλίου και τόσο μεγαλύτερες οι απώλειες πολικότητας, για μία δεδομένη πυκνότητα ρεύματος. Γι' αυτό, οι διεργασίες αεριοποίησης οι οποίες χρησιμοποιούν οξυγόνο είναι καταλληλότερες για ολοκλήρωση με κελλία καυσίμου, από αυτές που χρησιμοποιούν αέρα. Όμως, το καύσιμο αέριο θα πρέπει να περιέχει μία συγκεκριμένη ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα ή/και ύδατος, για την αποφυγή σχηματισμού άνθρακα στο κελλίο καυσίμου.



Αρχές λειτουργίας συστημάτων κελλίων καυσίμου - Ταξινόμηση

Εχουν αναπτυχθεί **3** τύποι κελλίων καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας για θερμοηλεκτρικές μονάδες οι οποίες χρησιμοποιούν άνθρακες. Οι τύποι αυτοί είναι

- το κελλίο καυσίμου φωσφορικού οξέος (**PAFC**),
- το κελλίο καυσίμου τηγμένων ανθρακικών (**MCFC**) και
- το κελλίο καυσίμου στερεού οξειδίου (**SOFC**).

Οι θερμοκρασίες λειτουργίας είναι περίπου 185°C για τα PAFC, 620°C για τα MCFC και 960°C για τα SOFC.



Αρχές λειτουργίας συστημάτων κελλίων καυσίμου - Ταξινόμηση

Τα πλεονεκτήματα της λειτουργίας σε υψηλή θερμοκρασία είναι:

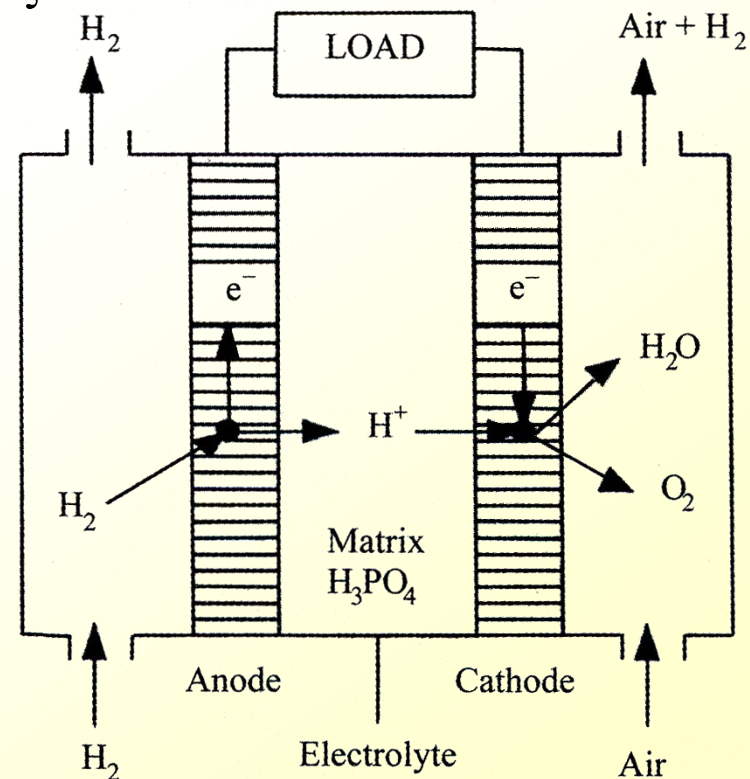
- οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις προχωρούν ταχύτερα, πράγμα που οδηγεί σε μικρότερες απώλειες τάσης ενεργοποίησης,
- τα καυσαέρια υψηλής θερμοκρασίας και τα υγρά ψύξης είναι μία πολύτιμη πηγή θέρμανσης για κτίρια, διεργασίες και εγκαταστάσεις κοντά στο κελίο καυσίμου, έτσι ώστε τα στοιχεία αυτά να αποτελούν εξαιρετικά συνδυασμένα συστήματα παραγωγής ισχύος και θερμότητας και
- τα καυσαέρια υψηλής θερμοκρασίας και τα υγρά ψύξης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να λειτουργήσουν στροβίλους που κινούν γεννήτριες, παράγοντας πρόσθετο ηλεκτρισμό.



Κελλία καυσίμου φωσφορικού οξέος – Αρχή λειτουργίας

Το καύσιμο και το οξειδωτικό μέσο εισέρχονται στους θαλάμους της ανόδου και της καθόδου, διαλύονται στον ηλεκτρολύτη και διαχέονται στα κέντρα του ηλεκτροκαταλύτη, στα πορώδη ηλεκτρόδια διάχυσης αερίων. Στα ηλεκτρόδια του κελτίου, σαν καταλύτης χρησιμοποιείται υποστηριζόμενος λευκόχρυσος.

Τα περισσότερα συστήματα λειτουργούν σε θερμοκρασίες περίπου 200°C και σε πιέσεις ίσες ή ελαφρά υψηλότερες από την ατμοσφαιρική. Στην θερμοκρασία λειτουργίας, ο ηλεκτρολύτης φωσφορικού οξέος είναι κυρίως σε μορφή πολυμερούς, σαν πυροφωσφορικό οξύ, και έχει καλή αγωγιμότητα. Το οξύ αυτό είναι ιονισμένο σε υψηλό βαθμό και είναι σταθερό σε ένα ηλεκτροχημικό περιβάλλον.





Κελλία καυσίμου φωσφορικού οξέος - Απόδοση

Στα θετικά χαρακτηριστικά του κελλίου PAFC συμπεριλαμβάνονται το ότι απωθεί το CO_2 , μπορεί να αντιμετωπίσει συγκεντρώσεις CO ύψους 1-2% στους 200°C , αλλά και να χρησιμοποιήσει αποδοτικά την απορριπτόμενη από την ηλεκτροχημική συστοιχία στοιχείων θερμότητα, για την θέρμανση χώρων ή την παροχή θερμού ύδατος.

Το κελλίο PAFC έχει διάφορες κρίσιμες παραμέτρους σχεδιασμού, οι οποίες είναι δυνατόν να μεταβληθούν, έτσι ώστε η απόδοσή του να βελτιστοποιηθεί και το σύστημα να παραμείνει βιώσιμο σε σχέση με τις αρχικές απαιτήσεις της αγοράς. Τέτοιες παράμετροι είναι **οι απαιτήσεις ψύξης του στοιχείου καυσίμου, ο σχεδιασμός του δικτύου του εναλλάκτη θερμότητας και οι συνθήκες λειτουργίας της διεργασίας.**



Κελλία καυσίμου



Κελλία καυσίμου φωσφορικού οξέος - Απόδοση

Η αποδοτικότητα των στοιχείων PAFC προσδιορίζεται μόνο από την **τάση εξόδου του κελλίου**. Η μείωση της πυκνότητας του ρεύματος αυξάνει την τάση εξόδου και κατά συνέπεια την αποδοτικότητα, ταυτόχρονα όμως αυξάνει και το κεφαλαιουχικό κόστος του κελλίου.

Οι μέθοδοι ψύξης των συστοιχιών κελλίων PAFC είναι η ψύξη με αέρα, η ψύξη με διηλεκτρικό υγρό και η ψύξη με νερό. Η ψύξη με ύδωρ είναι καλύτερη και πιο κατάλληλη για μεγαλύτερες μονάδες, ενώ η ψύξη με αέρα είναι απλή και κατάλληλη για σχετικά μικρές μονάδες.

Η διάρκεια ζωής των συστημάτων PAFC εκτιμάται σε περίπου 40.000 ώρες, δηλαδή περίπου 5 έτη συνεχούς λειτουργίας. Είναι γενικά αποδεκτό, ότι η μείωση της απόδοσης του κελλίου καυσίμου είναι το αποτέλεσμα της πυροσυσσωμάτωσης των σωματιδίων του καταλύτη Pt, της διάβρωσης του φορέα άνθρακα και της προοδευτικής εκχείλισης του ηλεκτρολύτη.



Κελλία καυσίμου φωσφορικού οξέος – Εφαρμογές, αναδρομή

Τα πρώτα ερευνητικά έργα στα στοιχεία PAFC ξεκίνησαν στις αρχές της δεκαετίας του 1960. Στις ΗΠΑ το 1967 και 1971, αντίστοιχα, εφαρμόστηκαν δύο μεγάλα προγράμματα επίδειξης, τα TARGET και FCG-1 για την ανάπτυξη μικρών μονάδων συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ισχύος, για οικιακή χρήση.

Η έκβαση αυτών των προγραμμάτων ενθάρρυνε πολλά προγράμματα ανάπτυξης στοιχείων PAFC, δυναμικότητας μεταξύ 10 kW και 7.5 MW, τα οποία αναπτύχθηκαν στα μέσα της δεκαετίας του 1980 σε οργανισμούς παραγωγής ηλεκτρισμού, ενώ η επίδειξη μίας μονάδας ισχύος δυναμικότητας 11 MW έγινε στην αρχή της δεκαετίας του 1990.



Κελλία καυσίμου φωσφορικού οξέος – Εφαρμογές, αναδρομή

Η ενεργειακή κρίση του 1973 επέκτεινε την ανάπτυξη μονάδων ισχύος κελλίου PAFC, όχι μόνο στις ΗΠΑ, αλλά και στην Ιαπωνία. Στα τέλη της δεκαετίας του 1980, κατασκευάστηκαν για επίδειξη μονάδες ισχύος 1MW, ενώ βρίσκονται σε εξέλιξη οι δοκιμές μονάδων ισχύος 200kW για επιτόπιες μονάδες ισχύος και για εμπορικές εφαρμογές.

Οι κυριότερες προσπάθειες στις ΗΠΑ και την Ιαπωνία επικεντρώνονται στην βελτίωση των συστημάτων PAFC για μονάδες στατικής διεσπαρμένης ισχύος και επιτόπιας συμπαραγωγής (CHP).

Πρόσφατα, πολλές μονάδες επίδειξης λειτουργούν και στην Ευρώπη.



Κελλία καυσίμου



Κελλία καυσίμου φωσφορικού οξέος – Εφαρμογές στις ΗΠΑ

Η Εταιρία IFC κατασκεύασε μία μονάδα ισχύος 4.8 MW, η οποία χρησιμοποιούσε ένα στοιχείο PAFC, και την εγκατέστησε στην Νέα Υόρκη το 1979. Η μονάδα έπαυσε να λειτουργεί το 1984, λόγω πολλών απρόβλεπτων προβλημάτων (εναλλάκτες θερμότητας μικρότερης από την αναγκαία δυναμικότητα, έλλειψη χώρου μεταξύ των τμημάτων για επισκευές, κ.λπ).

Μία παρόμοια μονάδα κατασκευάσθηκε με συστατικά μέρη μιας προηγμένης τεχνολογίας και δοκιμάσθηκε επιτυχώς από την Εταιρία Tokyo Electric Power μεταξύ των ετών 1983 και 1985, επιτυγχάνοντας συνολική αποδοτικότητα 36.7%.

Ξεκινώντας το 1985, οι εταιρίες IFC και Toshiba (της Ιαπωνίας) ανέπτυξαν από κοινού μία βελτιωμένη μονάδα κελλίου PAFC δυναμικότητας 11 MW, σχεδιασμένη να λειτουργεί με ένα αέριο περιέχον H_2 , από ένα σύστημα επεξεργασίας καυσίμου το οποίο βασίζεται στην χρήση άνθρακα ή θερμικά διασπασθέντος μεθανίου. Η μονάδα αυτή ξεκίνησε να λειτουργεί το 1991.



Κελλία καυσίμου φωσφορικού οξέος – Εφαρμογές στις ΗΠΑ

Σύγκριση απόδοσης μονάδων δυναμικότητας 4,5 MW και 11 MW

Αντικείμενο	4.5 MW	11 MW
Ισχύς (MW)	4.5	11
Αποδοτικότητα παραγωγής ηλεκτρισμού στην διανομή (%)	36.7	41.1
Εύρος ισχύος (%)	25-100	30-100
Πίεση λειτουργίας μονάδας (kg/cm ² g)	2.5	7.4
Εμβαδόν ενεργής επιφάνειας στοιχείου καυσίμου (cm ²)	3440	9300
Εμβαδόν επιφάνειας μονάδας (m ²)	3240	3300
Χρόνος έναρξης λειτουργίας (h)	4	6
Εκπομπές NO _x (ppm)	<10	≤10
Επίπεδο θορύβου στα όρια της μονάδας (dB)	≤55	≤55

Πρόσφατα, το ενδιαφέρον στις ΗΠΑ αυξάνεται και κατευθύνεται στην ολοκλήρωση των συστημάτων στοιχείων PAFC με αεριοποιητές άνθρακα, για την εξυπηρέτηση φορτίων βάσης, σε επίπεδα δυναμικότητας μεταξύ 50 MW και 250 MW.



Κελλία καυσίμου



Κελλία καυσίμου φωσφορικού οξέος – Εφαρμογές στην Ιαπωνία

Η Ιαπωνική Κυβέρνηση ξεκίνησε ένα ολοκληρωμένο σύστημα ανάπτυξης των διαφόρων τύπων κελλίων καυσίμου το 1981, στα πλαίσια του Έργου Moonlight, με κύρια εστίαση στην τεχνολογική ανάπτυξη των κελλίων PAFC.

Κατασκευάστηκαν δύο μονάδες επίδειξης δυναμικότητας 1MW, με κάπως διαφορετικές προδιαγραφές σχεδιασμού και με στόχο την επίτευξη μίας σταθερής λειτουργίας και απόδοσης, μέσω "λειτουργίας πραγματικού χρόνου". Ο στόχος της μίας ήταν η χρήση του κελλίου καυσίμου σε μία περιφερειακή μονάδα ισχύος και της άλλης η χρήση του σε μία κεντρική μονάδα ισχύος. Η επιτυχής λειτουργία τους επιτεύχθηκε το 1988.



Κελλία καυσίμου



Κελλία καυσίμου φωσφορικού οξέος – Εφαρμογές στην Ιαπωνία

Πέρα από τις μονάδες δυναμικότητας 1 MW, το Έργο Moonlight αναπτύχθηκε το 1986, ώστε να περιλαμβάνει και δύο μονάδες κελτίου PAFC δυναμικότητας 200 kW, για επιτόπια συμπαραγωγή και για παραγωγή σε απομακρυσμένο νησί. Μετά από μία επιτυχημένη λειτουργία μεταξύ 1990 και 1992, οι μονάδες αυτές έπαυσαν να λειτουργούν.

Βασικές προδιαγραφές μονάδων PAFC δυναμικότητας 100 kW και 200 kW

Τύπος	Περιφερειακή	Κεντρική Μονάδα
Ισχύς (στην παραγωγή)		1000-kW ac
Αποδοτικότητα (στην παραγωγή)	40% (HHV)	42% (HHV)
Συνθήκες λειτουργίας στοιχείων καυσίμου	5 ata, 190°C	7ata, 205°C
Φορτίο Pt		<6.5 g/kW
Μέθοδος ψύξης της συστοιχίας		Ψύξη με ύδωρ που βράζει
Καύσιμο		Φυσικό αέριο
Χρόνος εκκίνησης (από ψυχρό)		4 ώρες
Ισχύς (στην αποστολή)		200-kW ac
Αποδοτικότητα (στην αποστολή)	36% (HHV)	37.6% (HHV)
Συνθήκες λειτουργίας στοιχείων καυσίμου		1ata, 190°C
Φορτίο Pt		4.5 g/kW
Μέθοδος ψύξης της συστοιχίας		Ψύξη με ύδωρ
Καύσιμο	LNG	Μεθανόλη
Χρόνος εκκίνησης (από ψυχρό)		3 h
Σκοπός	Μονάδα επιτόπιας συμπαραγωγής	Πηγή ισχύος σε απομακρυσμένο νησί



Κελλία καυσίμου φωσφορικού οξέος – Εφαρμογές στην Ιαπωνία

Σε συνέχεια αυτών των μεγάλων έργων και με κυβερνητική επιχορήγηση, ιδιωτικές Ιαπωνικές εταιρίες παραγωγής ηλεκτρισμού και διαχείρισης αερίου ανέλαβαν, με αυξανόμενο ρυθμό, έργα με στόχο την προώθηση και την επιτάχυνση της εμπορικής εκμετάλλευσης αυτής της τεχνολογίας.

Τα περισσότερα αφορούν μονάδες μικρού μεγέθους, δυναμικότητας 50-200 kW, των εταιριών Toshiba, Fuji και Mitsubishi.

Μία εξαίρεση αποτελεί το έργο της IFC και Toshiba, δυναμικότητας 11 MW, όπου χρησιμοποιείται μία συστοιχία κελλίων φωσφορικού οξέος. Το σύστημα αυτό είναι το μεγαλύτερο σύστημα κελλίου καυσίμου στον κόσμο και συνεχίζει να λειτουργεί ικανοποιητικά.



Κελλία καυσίμου φωσφορικού οξέος – Εφαρμογές στην Ευρώπη

Η Ευρώπη δεν έχει παραγωγούς συστημάτων κελλίου PAFC, αλλά έχει σημαντικούς παραγωγούς συστημάτων αναμόρφωσης (Haldor Topsoe, Δανία και KTI, Ολλανδία, Ιταλία) και όξινης μετατροπής. Εταιρίες όπως οι Johnson, Matthey και AEG έχουν τεχνογνωσία σε στοιχεία PAFC. Έτσι, η βασική φιλοσοφία στις περισσότερες Ευρωπαϊκές εταιρίες είναι ο σχεδιασμός και η κατασκευή μονάδων κελλίων PAFC, οι οποίες χρησιμοποιούν συστήματα από την Ιαπωνία ή τις ΗΠΑ, αλλά όπου τα υπόλοιπα μέρη παρέχονται από Ευρωπαίους κατασκευαστές.

Ένα σημαντικό έργο είναι η κατασκευή μίας πιλοτικής μονάδας 1 MW στο Μιλάνο της Ιταλίας από τις εταιρείες Ansaldo και Haldor Topsoe, με συστοιχίες από την Αμερικανική Εταιρία IFC. Το έργο αυτό χρηματοδοτείται από το Ιταλικό Πρόγραμμα κελλίων φωσφορικού οξέος με κάποια ενίσχυση από την Επιτροπή της Ε.Ε.

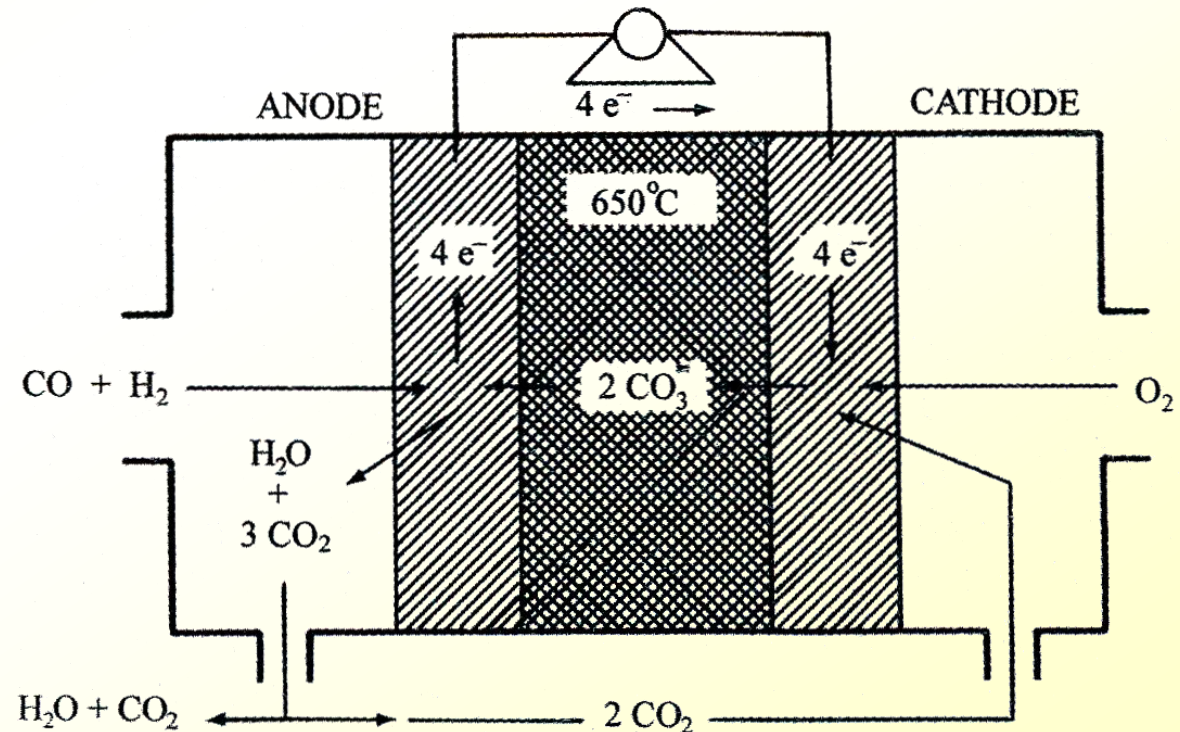


Κελλία καυσίμου

Κελλία καυσίμου τηγμένων ανθρακικών – Αρχή λειτουργίας

Το κελλίο καυσίμου τηγμένων ανθρακικών είναι ένας από τους δύο τύπους κελλίων καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας, οι οποίοι είναι και οι δύο το αποτέλεσμα κάποιων αρχικών προσπαθειών, για την κατασκευή μίας συσκευής άμεσης μετατροπής του άνθρακα σε ηλεκτρική ενέργεια.

Ο ηλεκτρολύτης είναι ένα τηγμένο μείγμα ανθρακικών αλκαλίων το οποίο συγκρατείται σε μια ημι-στερεή μήτρα κεραμικού υλικού. Τα ανθρακικά ιόντα παίζουν τον ρόλο του ιοντικού ρεύματος που μεταφέρεται από την κάθοδο προς την άνοδο.





Κελλία καυσίμου τηγμένων ανθρακικών – Αρχή λειτουργίας

Συνολική αντίδραση κελλίου: $a\text{H}_2 + b\text{CO} + 1/2 (a+b) \text{O}_2 \rightarrow a\text{H}_2\text{O} + b\text{CO}_2$

Τελικά, για κάθε 2 faradays παραγόμενου ηλεκτρισμού, χρησιμοποιείται 1 mole CO_2 . Κατά συνέπεια, είναι επιθυμητή η ανακύκλωση του CO_2 , ώστε να διατηρείται η σύνθεση του ηλεκτρολύτη σταθερή. Αυτό οδήγησε στην έρευνα για μία "συσκευή εναλλαγής προϊόντων", η οποία θα παρήγαγε ένα πλουσιότερο οξειδωτικό μέσο, με αποτέλεσμα μία υψηλότερη τάση κελλίου. Στην πράξη, βρέθηκε ότι είναι αρκετή η απομάκρυνση ενός μέρους του αερίου εξόδου της ανόδου μετά από πλήρη καύση και η ανάμειξή του με το ρεύμα αερίου της καθόδου.

Το νερό είναι ένα επίσης σημαντικό συστατικό του καυσίμου αερίου. Κι' αυτό γιατί πρέπει να είναι παρόν στο αέριο τροφοδοσίας, ιδιαίτερα σε μείγματα με υψηλή περιεκτικότητα CO , για την αποφυγή επικαθίσεων άνθρακα στα κανάλια καυσίμου τα οποία τροφοδοτούν το κελλίο, ή ακόμη και μέσα στο κελλίο.



Κελλία καυσίμου τηγμένων ανθρακικών - Απόδοση

Ενας σημαντικός περιορισμός της διάταξης των κελλίων MCFC είναι η ανάγκη μεταφοράς διοξειδίου του άνθρακα από το απαέριο της ανόδου στην εισαγωγή της καθόδου. Αυτό απαιτεί συσκευές απορρόφησης, συσκευές αναγέννησης, κλπ, πέρα από τον επιπρόσθετο εξοπλισμό για την ανακύκλωση του ανακτημένου CO₂ στην κάθοδο.

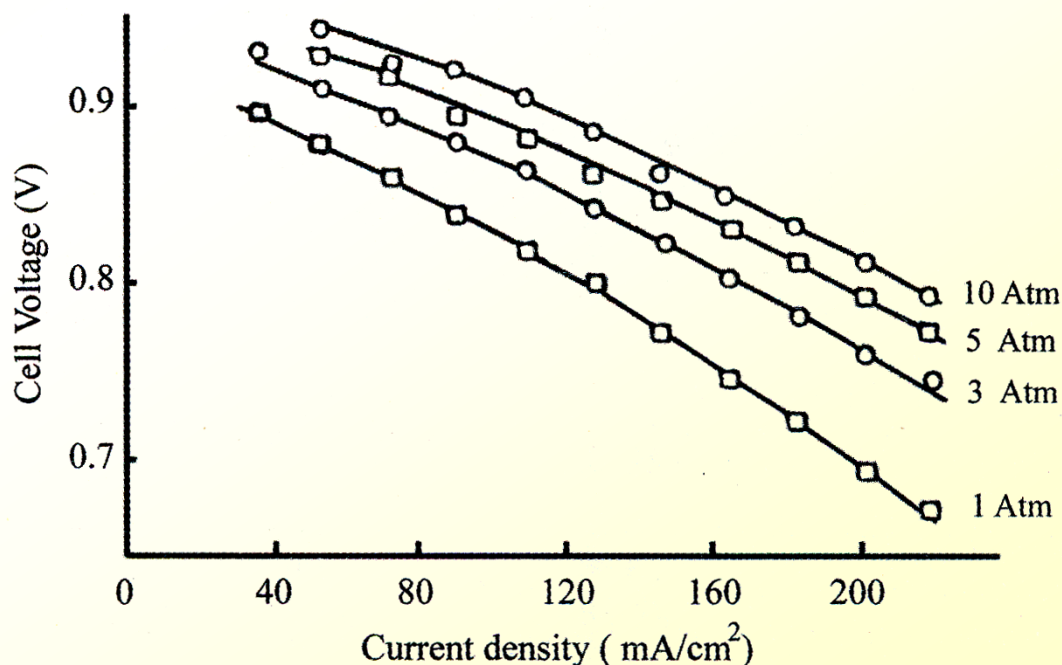
Σε διεθνές επίπεδο, οι περισσότερες προσπάθειες, για να καταστεί η τεχνολογία κελλίων MCFC εμπορικά εκμεταλλεύσιμη, εστιάζονται στην μέση αγορά παραγωγής ισχύος, σε ένα εύρος δυναμικότητας που κυμαίνεται μεταξύ αρκετών εκατοντάδων kWε μέχρι μερικών MWe. Εκτός από τις προσπάθειες μείωσης του μεγέθους και του κόστους, το μεγαλύτερο μέρος της προσοχής για τον σχεδιασμό και την βελτιστοποίηση του συστήματος εστιάζεται στην αξιοπιστία των μονάδων παραγωγής ισχύος με κελλία καυσίμου, χρησιμοποιώντας, για όσον το δυνατόν περισσότερα τμήματα, προϊόντα του εμπορίου με γνωστά χαρακτηριστικά.



Κελλία καυσίμου τηγμένων ανθρακικών - Απόδοση

Ο χαρακτηρισμός της απόδοσης ενός κελτίου ή μιας συστοιχίας κελλίων, απαιτεί τον προσδιορισμό **καμπυλών ρεύματος-τάσης** για δεδομένες συνθήκες λειτουργίας, οι οποίες συμπεριλαμβάνουν την θερμοκρασία και την πίεση, την σύνθεση τροφοδοσίας του καυσίμου και του οξειδωτικού μέσου, καθώς και την ποσόστωση της χρήσης του καυσίμου και του οξειδωτικού μέσου.

Για τις συνθέσεις του αερίου καυσίμου που χρησιμοποιούνται συνήθως και για συνήθη οξειδωτικά μέσα σε συνεχή χρησιμοποίηση, η **τάση εξαρτάται από την πυκνότητα του ρεύματος κατά σχεδόν γραμμικό τρόπο**, σε όλο το εύρος λειτουργίας των κελλίων καυσίμου.



Καμπύλες απόδοσης σταθερής χρήσης



Κελλία καυσίμου τηγμένων ανθρακικών - Απόδοση

Η επίδραση της **σύνθεσης του αερίου** στην απόδοση είναι πολύ σημαντική, για τον βέλτιστο σχεδιασμό και την επιλογή των συνθηκών λειτουργίας των συστοιχιών κελλίων καυσίμου. Ιδιαίτερου ενδιαφέροντος επίσης είναι η επίδραση της μερικής πίεσης του CO_2 στην απόδοση της καθόδου, καθότι το CO_2 πρέπει να ελαχιστοποιηθεί, ώστε να μειωθεί η διαλυτότητα του NiO και να αυξηθεί η διάρκεια ζωής του κελλίου.

Οι προσμείξεις του αερίου οι οποίες προέρχονται από ακατέργαστο άνθρακα ξεπερνούν τα επίπεδα ανοχής των συστημάτων κελλίων MCFC, προξενώντας διάβρωση των μεταλλικών τμημάτων και μειώνοντας την δραστηριότητα του ηλεκτρολύτη και των ηλεκτροδίων. Επίσης, οι ενώσεις του θείου, και ειδικότερα το H_2S , προξενούν σοβαρή μείωση της απόδοσης.



Κελλία καυσίμου τηγμένων ανθρακικών - Εφαρμογές, αναδρομή

Τα κελλία MCFC, τα οποία σαν αντίληψη έχουν μία ηλικία 50 ετών, έχουν φθάσει, όσον αφορά στο επίπεδο επίδειξης συστοιχιών, στο τελευταίο στάδιο πριν την εμπορική εκμετάλλευση.

Η έρευνα στα συστήματα αυτά χαρακτηρίζεται από τις υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας, οι οποίες παρέχουν την δυνατότητα επίτευξης υψηλότερων επιπέδων θερμικής αποδοτικότητας σε σύγκριση με τα PAFC, όταν αυτά χρησιμοποιούν αέριο που προέρχεται από την χρήση άνθρακα, καθώς και από το χαμηλότερο κόστος. Όμως, η λειτουργία στην υψηλή αυτή θερμοκρασία απαιτεί περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη πριν τα συστήματα MCFC μπορέσουν να προσεγγίσουν το επίπεδο τεχνικής ωρίμανσης και εμπορικής καταλληλότητας, στο οποίο έχουν φθάσει τα PAFC. Μία πρόσφατη έρευνα (1999) έδειξε ότι τα συστήματα MCFC απέχουν ακόμη μερικά έτη από το να είναι εμπορικά εκμεταλλεύσιμα.



Κελλία καυσίμου τηγμένων ανθρακικών – Εφαρμογές στις ΗΠΑ

Στις ΗΠΑ, οι πρώτες συστοιχίες κελλίων MCFC τέθηκαν σε λειτουργία στις αρχές της δεκαετίας του 1980. Αυτές οι συστοιχίες έχουν χρησιμοποιήσει αέριο χαμηλής -HHV υπό πίεση 0.44 MPa, που δίδει ισχύ εξόδου περίπου 2.5 kW.

Η ERC κατασκεύασε και δοκίμασε διάφορες συστοιχίες που χρησιμοποιούν στοιχεία εμβαδού 0.4 m². Πρόσφατα, μία συστοιχία 2 kW, αποτελούμενη από πέντε στοιχεία εμβαδού 4000 cm², λειτούργησε για 10.000 ώρες. Η πτώση της απόδοσης για 40.000 ώρες λειτουργίας υπολογίσθηκε σε 125 mV. Μία μικρή συστοιχία πέντε κελλίων (εμβαδού επιφανείας κελλίων 300 cm²) έδειξε μικρότερη απώλεια (η απώλεια στις 40.000 ώρες λειτουργίας υπολογίσθηκε σε 75 mV).

Το 1992, προγραμματίσθηκαν δοκιμές των συστοιχιών δυναμικότητας 100kW της ERC, ενώ το 1994 προγραμματίσθηκαν δοκιμές μίας μονάδας παραγωγής ισχύος δυναμικότητας 2 MW στην Santa Clara, CA.



Κελλία καυσίμου τηγμένων ανθρακικών – Εφαρμογές στις ΗΠΑ

Πρόσφατα, η ERC ανέπτυξε την διάταξη ενός συστήματος κελλίων MCFC, δυναμικότητας 200 W, για εφαρμογή στην παραγωγή ηλεκτρισμού για κανονική παροχή.

Χαρακτηριστικά μονάδας ισχύος CGMCFC της ERC

Μέγεθος	200-MW
Κύρια Υποσυστήματα	Αεριοποιητής, καθαρισμός αερίου, μονάδα εκτόνωσης απαερίων του MCFC, στρόβιλος ατμού
Αεριοποιητής	Παρασυρόμενης κλίνης, κινητής κλίνης, ρευστοστερεάς κλίνης
Καθαρ. Αερίων	Σύστημα αερίων Dow /Rectisol, σιδηρούχος ψευδάργυρος με χλωρίδια και κλίνες προστασίας από ενώσεις θείου
MCFC	Διαφόρων καυσίμων; ατμοσφ. πίεση; εναλλάξιμες παλέττες 2.5 MW
Μονάδα Εκτόνωσης	527 psia, 700° F
Στρόβιλος Ατμού	1500 psia, 1000° F ατμού (επαναθέρμανση όπου είναι δυνατόν)
Οξειδωτικό Μέσο	Κρουογενικό οξυγόνο για αεριοποιητή (95%), αέρας για MCFC
Καύσιμο	Εγχώριος γαιάνθρακας (εφεδρική χρήση φυσικού αερίου)



Κελλία καυσίμου τηγμένων ανθρακικών – Εφαρμογές στις ΗΠΑ

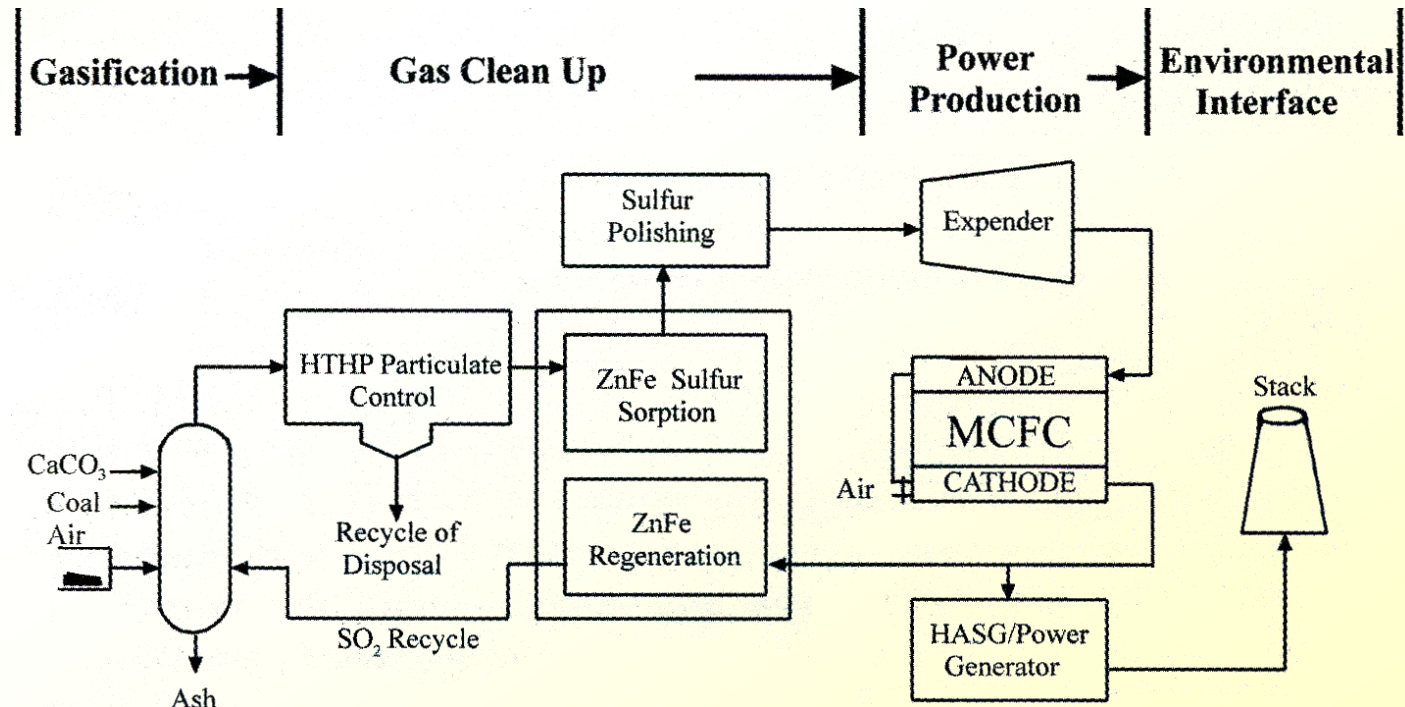
Μία μονάδα η οποία χρησιμοποιεί ένα **κελλίο καυσίμου τηγμένων ανθρακικών σε συνδυασμό με αεριοποίηση άνθρακα (CGMFCF)**, περιλαμβάνει:

➤ έναν αεριοποιητή παράσυρσης υπό πίεση 4 MPa και με χρήση οξυγόνου ή έναν αεριοποιητή ρευστοστερεάς κλίνης υπό πίεση 3 MPa με χρήση οξυγόνου,

➤ ένα σύστημα κελλίων MCFC με καθαρισμό των θερμών αερίων και

και

➤ υπο-συστήματα μονάδας εκτόνωσης και στροβίλου ατμού χαμηλής θερμοκρασίας



Αρχές συστήματος CGMFCF



Κελλία καυσίμου τηγμένων ανθρακικών – Εφαρμογές στις ΗΠΑ

Ανάλογα με τον τύπο του στροβίλου που χρησιμοποιείται, τα συστήματα CGMCFC που σχεδιάσθηκαν είχαν θερμική αποδοτικότητα μεταξύ 45% και 49%, ρυθμούς θερμότητας μεταξύ 7000 kJ/hkW και 8440 kJ/hkW, χρήση καυσίμου μεταξύ 50% και 85% και πολύ χαμηλά επίπεδα εκπομπών στο περιβάλλον.

Σύγκριση συστημάτων MCFC και ανταγωνιστικών συστημάτων. Τα MCFC προσφέρουν υψηλότερη απόδοση, χαμηλότερες εκπομπές και πολύ ανταγωνιστικό κόστος.

	Συστήματα MCFC			Ανταγωνιστικά Συστήματα		
	Texaco O ₂ CGG	BGL O ₂ CGG	KRW O ₂ HGG	IGCG	PC	AFBC
Απόδοση:						
Μικτή ισχύς (kW)	289	243	247	259	207	210
Ωφέλιμη ισχύς (kW)	238	205	209	234	196	196
Ρυθμός θερμότητας (Btu/kWh)	7565	7379	7246	8420	9926	10120
Κόστος:						
Κεφαλαιουχικό \$/kW	1928	1965	1802	1522	1745	1706
Συντελεστής απόδοσης(%)	85	85	85	80	65	65
COE Mills/kWh	46.5	49.1	49.7	47.4	59.6	61.4
Εκπομπές:						
SO _x (lb/MWh)	0.05	0.5	0.006	0.08	3.95	4.0
(% απομάκρυνσης)	99.9	99.2	100	99.8	90	90
NO _x (lb/MWh)	Trace	0.18	0.09	1.0	6.1	0.8
(lb/MMBtu)	Trace	0.02	0.01	0.12	0.61	0.08
CO ₂ (ton/MWh)	0.79	0.77	0.80	0.93	1.0	1.05
Απαιτήσεις σε ύδωρ συμπλήρωσης (gpm)	1440	1401	1551	2235	2288	1903



Κελλία καυσίμου



Κελλία καυσίμου τηγμένων ανθρακικών – Εφαρμογές στην Ιαπωνία

Το ενδιαφέρον της Ιαπωνίας για στοιχεία MCFC ξεκίνησε το 1981 και εκδηλώνεται στην έρευνα και στην ανάπτυξη συστοιχιών κελλίων καυσίμου, καθώς και δευτερεύουσων συσκευών και τεχνολογιών συστημάτων.

Το έργο New Sunshine στοχεύει στην κατασκευή μίας πιλοτικής μονάδας δυναμικότητας 1 MW, με αποδοτικότητα παραγωγής ηλεκτρισμού τουλάχιστον 45%, η οποία ολοκληρώθηκε και τέθηκε σε δοκιμή το 1997. Το πρόγραμμα εκτελέστηκε, απο κοινού, από τρεις κατασκευαστές συστημάτων MCFC (IHI, Hitachi και Mitsubishi Electric Company).

Το 1993 και οι τρεις κατασκευαστές είχαν επιτύχει το στάδιο δυναμικότητας των 100 kW. Οι εταιρίες IHI και Hitachi ανέπτυξαν αντίστοιχα δύο τύπους συστοιχιών 1m² και δυναμικότητας 100kW, που λειτουργούσαν με εξωτερικά αναμορφωμένο καύσιμο.



Κελλία καυσίμου τηγμένων ανθρακικών – Εφαρμογές στην Ιαπωνία

Ιδιωτικά έργα ανάπτυξης συστημάτων MCFC με χρηματοδότηση από το Κέντρο Ερευνών Πετρελαίου, (PEC) και μεμονωμένες εταιρίες παραγωγής ηλεκτρισμού βρίσκονται επίσης σε εξέλιξη στην Ιαπωνία, διενεργώντας δοκιμές σε συστοιχίες κελλίων MCFC δυναμικότητας 10 kW, με εξωτερική αναμόρφωση.

Οι δοκιμές αυτές δείχνουν τα αδιαφιλονίκητα πλεονεκτήματα των συστημάτων κελλίων MCFC, όσον αφορά στην θερμική τους αποδοτικότητα και στα περιβαλλοντικά οφέλη.



Κελλία καυσίμου τηγμένων ανθρακικών – Εφαρμογές στην Ευρώπη

Το κελλίο MCFC εφευρέθηκε και αναπτύχθηκε κατ' αρχάς στην Ευρώπη, την δεκαετία του 1950, αλλά τα προγράμματα ανάπτυξης MCFC ουσιαστικά ξεκίνησαν στην Ευρώπη το 1986.

Πολλά Εθνικά Προγράμματα, με παράλληλη χρηματοδότηση της Επιτροπής των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, βρίσκονται σε εξέλιξη στην Ολλανδία, την Ιταλία και την Γερμανία, κάθε ένα από τα οποία βρίσκεται σε στενή συνεργασία με ένα φορέα ανάπτυξης από τις ΗΠΑ Η Ισπανία και η Σουηδία εκδήλωσαν επίσης ενδιαφέρον για τα κελλία MCFC το 1988.

Στην Ιταλία, η Ansaldo κατασκεύασε μία μονάδα δυναμικότητας 300MW με εξωτερική αναμόρφωση, το 1994, σε συνεργασία με την IFC. Ο Κυβερνητικός Οργανισμός Ενέργειας, ENEA, είναι υπεύθυνος για την συνολική διαχείριση του προγράμματος αυτού, όπου συμμετέχουν επίσης ορισμένα Πανεπιστήμια και Ερευνητικά Κέντρα.



Κελλία καυσίμου τηγμένων ανθρακικών – Εφαρμογές στην Ευρώπη

Στην Γερμανία, η Messerschmitt Bolkow Blohm GmbH (MBB), σε συνεργασία με την ERC, κατασκεύασε μονάδες δυναμικότητας 250kW, οι οποίες άρχισαν να λειτουργούν το 1994.

Επίσης, η εταιρία MTU Friedrichshafen έχει αναπτύξει την αρχή της "θερμής υπομονάδας". Κατασκευασμένο σε κλίμακα περίπου 260kW, το σύστημα αυτό είναι σχεδιασμένο για εφαρμογές συμπαραγωγής, βιομηχανικού και εμπορικού επιπέδου.

Η Ισπανία ξεκίνησε επίσης ένα πενταετές πρόγραμμα στοιχείων MCFC το 1993.



Κελλία καυσίμου



Κελλία καυσίμου στερεού οξειδίου – Αρχή λειτουργίας

Το κελλίο καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC) είναι ένα σύστημα ενέργειας στερεής φάσης και λειτουργεί σε ατμοσφαιρική ή αυξημένη πίεση και υψηλές θερμοκρασίες (1000°C), για να εξασφαλίζει την ιοντική και ηλεκτρονιακή αγωγιμότητα των συστατικών του.

Ο ηλεκτρολύτης, ο μηχανισμός του οποίου είναι ιοντικός, είναι ζιρκόνια σταθεροποιημένη με οξείδια του υτρίου. Ο ηλεκτρολύτης αυτός είναι καλυμμένος από πορώδη, κεραμικά ηλεκτρόδια, δηλαδή λανθανιούχο μαγγανίτη με ενίσχυση στροντίου για την κάθοδο και μεταλλοκεραμικό μείγμα νικελίου-ζιρκονίας για την άνοδο.

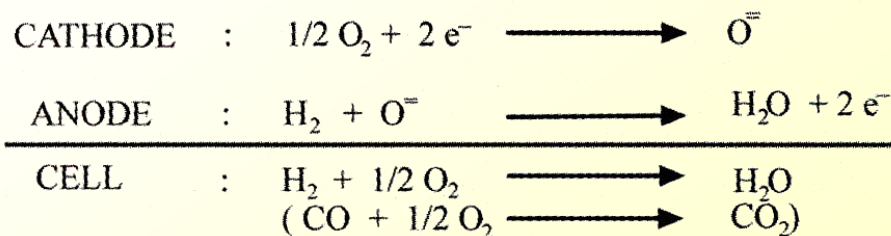
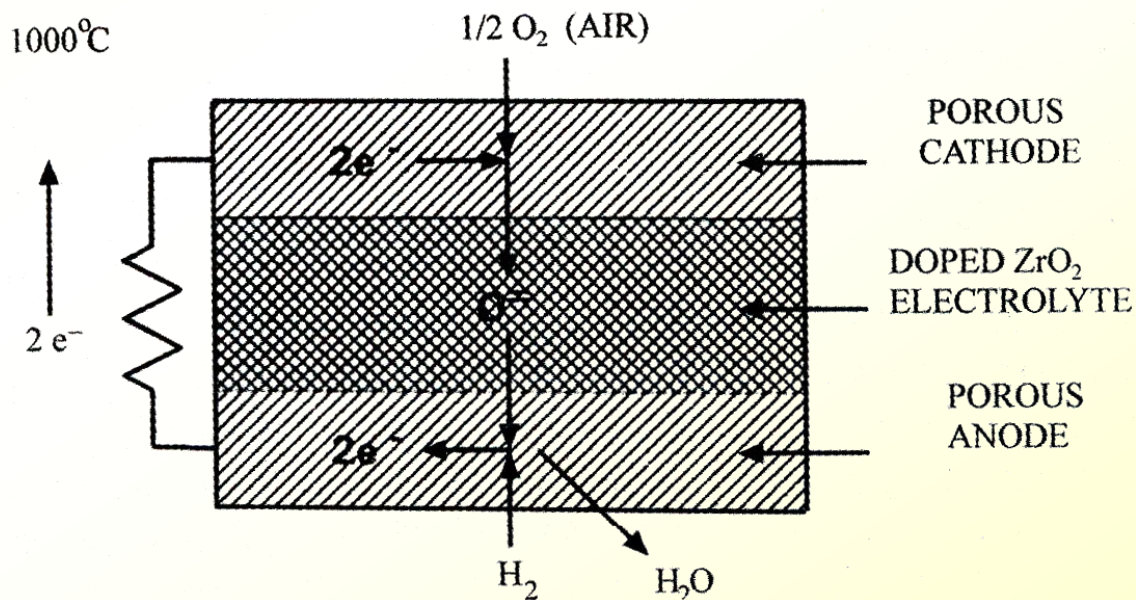
Η θερμοκρασία των αερίων εκτόνωσης είναι μεταξύ 500°C και 900°C , εύρος το οποίο είναι ελκυστικό για εφαρμογές συμπαραγωγής ή για χρήση σε στροβίλους χαμηλής θερμοκρασίας, για όλες τις μονάδες ισχύος ενός κεντρικού σταθμού παραγωγής.



Κελλία καυσίμου στερεού οξειδίου – Αρχή λειτουργίας

Τα ηλεκτρόνια τα οποία κινούνται από την άνοδο, δια μέσου του εξωτερικού κυκλώματος, προς την κάθοδο παράγουν έργο, λόγω της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων αυτών.

Τα ηλεκτρόνια μεταφέρουν το φορτίο τους, στην διεπιφάνεια ηλεκτρολύτη-καθόδου, σε μόρια οξυγόνου, τα οποία προσάγονται στην εσωτερική επιφάνεια του κελλίου από τον αέρα, για την παραγωγή ιόντων οξειδίων.





Κελλία καυσίμου



Κελλία καυσίμου στερεού οξειδίου – Αρχή λειτουργίας

Τα ιόντα οξειδίων μεταφέρονται μέσω του ηλεκτρολύτη στην διεπιφάνεια ηλεκτρολύτη-ανόδου, όπου ενώνονται με υδρογόνο και μονοξείδιο του άνθρακα, από το καύσιμο αέριο που ρέει στην εξωτερική επιφάνεια, για την παραγωγή ύδατος και διοξειδίου του άνθρακα αντίστοιχα, καθώς και ηλεκτρονίων, τα οποία συμπληρώνουν το κύκλωμα.



Κελλία καυσίμου



Κελλία καυσίμου στερεού οξειδίου – Απόδοση

Τα κελλία SOFC μπορούν να μετατρέψουν μείγματα αερίων υδρογόνου και μονοξειδίου του άνθρακα, τα οποία προέρχονται από την χρήση άνθρακα, απευθείας σε ηλεκτρισμό.

Δεν χρησιμοποιούν ευγενείς καταλύτες και μπορούν να λειτουργήσουν απευθείας με αέρα.

Ο στερεός ηλεκτρολύτης επιτρέπει υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας (1000°C) με βελτίωση της κινητικής των αντιδράσεων των ηλεκτροδίων, ελαχιστοποίηση της δηλητηρίασης των καταλυτών και παραγωγή πολύτιμης ανακτήσιμης θερμότητας.

Όπως και με όλους τους τύπους κελλίων καυσίμου, η αύξηση της πίεσης του κελλίου, βελτιώνει την απόδοσή του.



Κελλία καυσίμου στερεού οξειδίου – Απόδοση

Όταν τα κελλία αυτά λειτουργούν σε συνδυασμό με μονάδες αεριοποίησης άνθρακα, έχουν την υψηλότερη αποδοτικότητα, πάνω από 60%, μεταξύ όλων των κελλίων καυσίμου, χρησιμοποιώντας την υψηλής θερμοκρασίας θερμότητα που χάνεται. Επιπρόσθετα, είναι εξαιρετικά φιλικά προς το περιβάλλον.

Η αμμωνία δεν φαίνεται να έχει κάποια επίδραση, ενώ μία συγκέντρωση υδρόθειου της τάξης των 50 ppm στο καύσιμο, μειώνει την τάση λειτουργίας του κελλίου μόνο κατά 5%. Σε ένα τυπικό κελλίο καυσίμου το οποίο αποτελείται κατά 25% από H_2-H_2O και κατά 75% από $CO-CO_2$ στους $700^\circ C$, το επίπεδο ανοχής συγκέντρωσης H_2S στην άνοδο νικελίου είναι περίπου 5 ppm, ενώ στους $1000^\circ C$ είναι περίπου 90 ppm. Η ανοχή του μεταλλοκεραμικού μείγματος κοβαλτίου σε συγκεντρώσεις θείου, στους $1000^\circ C$, είναι περίπου 200 ppm. Αυτά τα επίπεδα ανοχής συγκεντρώσεων του θείου είναι περίπου μία με δύο τάξεις μεγέθους υψηλότερα, από τα αντίστοιχα για άλλους τύπους κελλίων καυσίμου.



Κελλία καυσίμου



Κελλία καυσίμου στερεού οξειδίου – Απόδοση

Από την άλλη πλευρά, η θερμική ασυμβατότητα των υλικών, οι δύσκολες τεχνικές κατασκευής και ο μεγάλος αριθμός μικρών στοιχείων, που απαιτούνται για μία μονάδα δυναμικότητας της τάξης των MW, είναι μερικά από τα προβλήματα τα οποία πρέπει να επιλυθούν κατά την ανάπτυξη της τεχνολογίας αυτής.



Κελλία καυσίμου στερεού οξειδίου – Εφαρμογές, αναδρομή

Η ανάπτυξη των στοιχείων SOFC συντελείται ενεργά στις ΗΠΑ, την Ιαπωνία και την Ευρώπη. Οι ενέργειες προτεραιότητας είναι

- ❑ η περαιτέρω βελτίωση των τμημάτων των στοιχείων για την αύξηση των πυκνοτήτων ισχύος (π.χ. ολοκληρωμένες τεχνικές λεπτής μεμβράνης για κατασκευή ηλεκτρολύτη),
- ❑ η ανάπτυξη κατάλληλων σχεδιασμών και κατασκευαστικών τεχνολογιών για μεγάλες υπο-μονάδες με υψηλή πυκνότητα ισχύος και μικρό κεφαλαιουχικό κόστος και
- ❑ η διερεύνηση και επίδειξη μίας ολοκληρωμένης αναμόρφωσης.



Κελλία καυσίμου στερεού οξειδίου – Εφαρμογές στις ΗΠΑ

Το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ (DOE) χρηματοδοτεί πολλά έργα έρευνας και ανάπτυξης των στοιχείων SOFC, διαφόρων οργανισμών, όπως οι EPRI και GRI. Έχουν κατασκευασθεί και δοκιμασθεί, για εκτεταμένες περιόδους, μονάδες ισχύος δυναμικότητας από 3 kW μέχρι 200 kW. Οι μονάδες αυτές ικανοποιούν τις προδιαγραφές-στόχο, με επίπεδα διαθεσιμότητας μεγαλύτερα από 98% και επίπεδα αποδοτικότητας περίπου 50%.

Στα μέσα της δεκαετίας του 1990 σχεδιάστηκε η ανάπτυξη μονάδων ισχύος από 1 MW μέχρι 50 MW.



Κελλία καυσίμου



Κελλία καυσίμου στερεού οξειδίου – Εφαρμογές στην Ιαπωνία

Το 1992, η EPRI υλοποίησε μία μονάδα αξιολόγησης της τεχνολογίας στοιχείων SOFC της Westinghouse, για εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρισμού στην Ιαπωνία. Η μελέτη έδειξε ωφέλιμη απόδοση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας περίπου 47% HHV, στην περίπτωση μίας ολοκληρωμένης μονάδας παραγωγής ισχύος 300 MWe, με αεριοποίηση άνθρακα και χρήση κελλίου SOFC. Στο σύστημα αυτό, προτάθηκε η χρήση 2 αεριοποιητών Shell που χρησιμοποιούν οξυγόνο για μετατροπή του άνθρακα. Το σύστημα SOFC αποτελείται από 96 υπο-μονάδες, οι οποίες παράγουν το 60% της συνολικής ποσότητας ηλεκτρισμού. Κάθε υπο-μονάδα έχει μία ονομαστική τιμή ισχύος συνεχούς ρεύματος 2.5MW και αποτελείται από 9.792 κελλία. Στο σύστημα ανάκτησης θερμότητας, για παραγωγή ατμού, παράγεται ατμός υψηλής ποιότητας για χρήση στην παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Το σύστημα περιλαμβάνει επίσης ένα υποσύστημα καθαρισμού αερίων υψηλής θερμοκρασίας, για απομάκρυνση της σωματιδιακής ύλης και του θείου.



Κελλία καυσίμου στερεού οξειδίου – Εφαρμογές στις ΗΠΑ

Η Ιαπωνική κυβέρνηση χρηματοδότησε την έρευνα των στοιχείων SOFC από το 1989, επικεντρωνόμενη σε θέματα που αφορούν τους διαχωριστές από κεραμικά υλικά και κράμματα, την τεχνολογία συνκαύσης, την στεγανοποίηση αερίων και τον ψεκασμό πλάσματος.

Οι Εταιρίες TEPCO, KEPCO και Osaka Gas έχουν δοκιμάσει σε μεγάλη έκταση σωληνοειδείς μονάδες (δυναμικότητας μέχρι 25kW). Μία ολοκληρωμένη μονολιθική συστοιχία πολλαπλών επιπέδων δυναμικότητας 1kW επιδείχθηκε το 1992 και η σημερινή της δυναμικότητα ανταποκρίνεται σε συστοιχίες με περισσότερα από 40 κελλία εμβαδού 205 cm² το κάθε ένα. Το μεγαλύτερο επίπεδο SOFC, το οποίο έχει επιδειχθεί μέχρι σήμερα, είναι το αποτέλεσμα μίας ιδιωτικής ανάπτυξης από την εταιρία Mitsubishi Heavy Industries, σε συνεργασία με την Chubu Electric Power.



Κελλία καυσίμου



Κελλία καυσίμου στερεού οξειδίου – Εφαρμογές στην Ευρώπη

Στην Ευρώπη, το βιομηχανικό ενδιαφέρον για τα κελλία SOFC είναι ισχυρό, πιθανόν λόγω του γεγονότος ότι τα κελλία SOFC μπορούν να συνδυασθούν με τις υφιστάμενες τεχνολογίες παραγωγής ισχύος, όπως οι ατμοστρόβιλοι ή τα συστήματα συνδυασμένου κύκλου. Σήμερα, στην ΕΕ διεξάγονται έρευνες για τα κελλία SOFC στην Γερμανία, την Ολλανδία, την Ελβετία, την Αγγλία, την Ιταλία και την Νορβηγία.

Η Επιτροπή της Ευρωπαϊκής Κοινότητας ξεκίνησε ένα διετές ερευνητικό πρόγραμμα για τα κελλία SOFC το 1987. Η βασική έρευνα εστιάσθηκε στην ανάπτυξη νέων υλικών ηλεκτροδίων και ηλεκτρολυτών. Υλοποιήθηκαν τόσο μία έρευνα αγοράς, όσο και μία μελέτη συστημάτων. Η έρευνα αγοράς επικεντρώθηκε σε μονάδες 200 kWe για βιομηχανική συμπαραγωγή, καθώς και σε μονάδες 200 MWe, μαζί με μονάδες συνδυασμένου κύκλου, για την παραγωγή ισχύος.



Κελλία καυσίμου στερεού οξειδίου – Εφαρμογές στην Ευρώπη

Μέχρι το 2015, αναμένεται ότι η συνολική αγορά στοιχείων SOFC θα είναι της τάξης των 80.000MW.

Η μελέτη συστημάτων, η οποία υλοποιήθηκε από το Ινστιτούτο TNO, διερεύνησε μία μονάδα συμπαραγωγής 200 kWe και μία μονάδα ισχύος 100 MWe, που αποτελούντο από ένα κελλίο SOFC με ένα αεριοστρόβιλο χαμηλής θερμοκρασίας. Από τις μελέτες αυτές εξήχθη το συμπέρασμα ότι μπορούν να αναπτυχθούν οικονομικά συμφέροντα κελλία SOFC με τα υπάρχοντα υλικά.



Κελλία καυσίμου



Περιβαλλοντικά θέματα

Τα κελλία καυσίμου έχουν **μικρότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον** από ότι οι συμβατικές θερμοηλεκτρικές μονάδες, αφού βελτιώνουν την ποιότητα του αέρα, του ύδατος και το επίπεδο θορύβου.

Επειδή ένα κελλίο καυσίμου δεν εξαρτάται από την διεργασία καύσης ενός καυσίμου, οι εκπομπές ρύπων στον αέρα εκτιμάται ότι είναι από 1000 έως 10000 φορές μικρότερες από αυτές των νέων μονάδων που χρησιμοποιούν συμβατικά καύσιμα, έστω και αν οι μονάδες αυτές χρησιμοποιούν τα πιο προηγμένα συστήματα ελέγχου των εκπομπών.

Οι χαμηλές εκπομπές των κελλίων καυσίμου τους επιτρέπουν να εγκατασταθούν κοντά σε αστικές πυκνοκατοικημένες περιοχές με απαιτήσεις για καθαρό αέρα, όπου τα ωφέλη τους είναι αναγκαία.



Κελλία καυσίμου



Περιβαλλοντικά θέματα

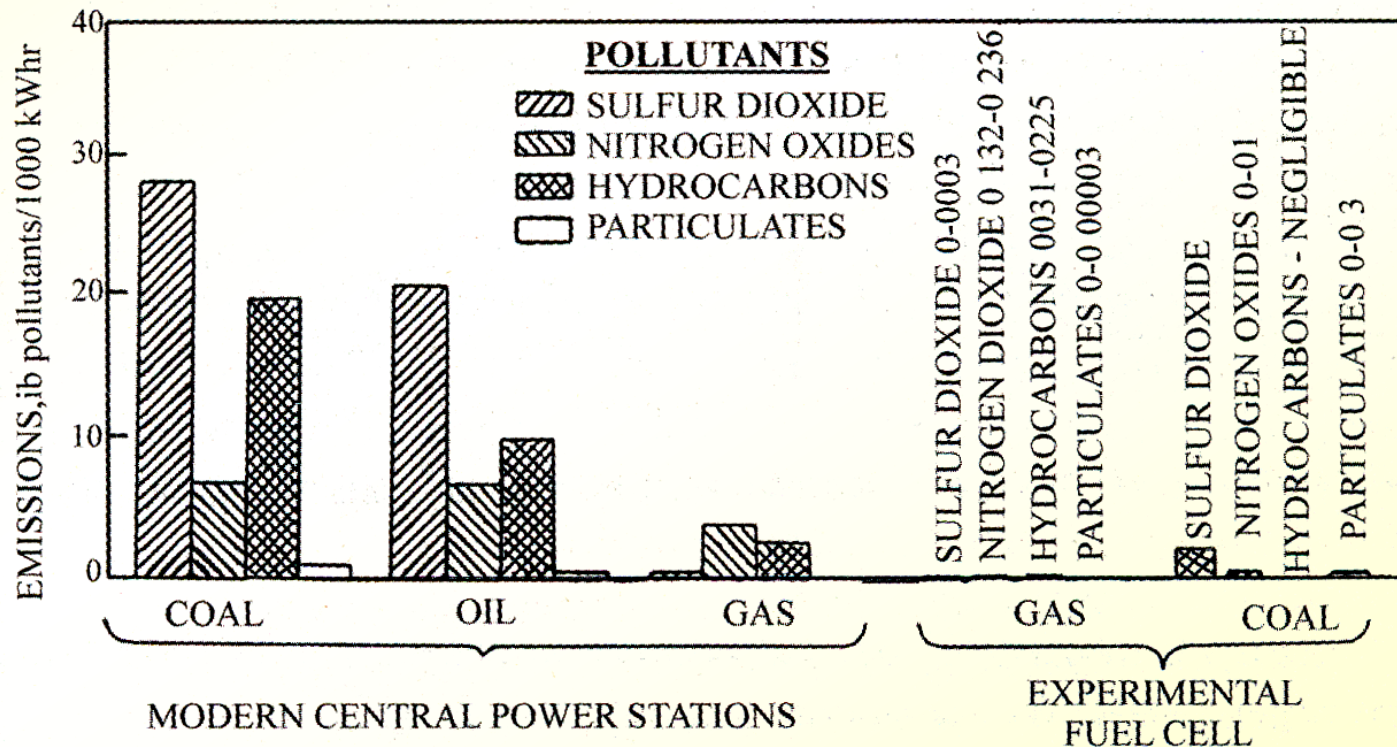
Επίσης, η μείωση των οξειδίων αζώτου και θείου (το θείο πρέπει να απομακρυνθεί από το καύσιμο αέριο, σύμφωνα με τις προδιαγραφές που απαιτούνται για την λειτουργία των κελλίων καυσίμου) επιτρέπει την ελάττωση των επιπτώσεων της όξινης βροχής.

Επιπρόσθετα, οι μονάδες κελλίου καυσίμου επιτυγχάνουν μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα, που αποτελεί την βασική αιτία του φαινομένου του θερμοκηπίου, συγκρινόμενες με συμβατικές μονάδες αερίου, λόγω της μεγαλύτερης αποδοτικότητάς τους.



Περιβαλλοντικά θέματα

Όταν χρησιμοποιείται άνθρακας, ένας αεριοποιητής μετατρέπει τον άνθρακα σε ένα πλούσιο σε υδρογόνο αέριο. Στην περίπτωση αυτή, ο αεριοποιητής είναι η κύρια πηγή ρύπανσης.



Σύγκριση εκπομπών συστημάτων παραγωγής ισχύος



Κελλία καυσίμου



Περιβαλλοντικά θέματα

Η ρύπανση αυτή, από την άλλη πλευρά, είναι σημαντικά χαμηλότερη από αυτήν που προέρχεται από την καύση του κονιοποιημένου άνθρακα. Έτσι, αν οι αεριοποιητές άνθρακα επικρατήσουν στο μέλλον, τα κελλία καυσίμου μπορεί να γίνουν πολύ ελκυστικά, όχι μόνο από την πλευρά της εξοικονόμησης ενέργειας και της μείωσης του κόστους, αλλά και από την πλευρά του περιορισμού της ρύπανσης.



Κελλία καυσίμου



Περιβαλλοντικά θέματα

Η χρήση των κελλίων καυσίμου αναμένεται επίσης να παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα, όσον αφορά στην **χρήση και στην ποιότητα του ύδατος**.

Επειδή η ηλεκτροχημική αντίδραση στα κελλία καυσίμου παράγει νερό ως ένα υπο-προϊόν, απαιτούνται μικρές ή και καθόλου ποσότητες ύδατος για την λειτουργία τους. Σε αντίθεση, οι συμβατικές μονάδες παραγωγής απαιτούν τεράστιες ποσότητες ύδατος για ψύξη των συστημάτων. Οι επιπτώσεις αυτών των απαιτήσεων στα υδάτινα οικοσυστήματα και στις πηγές ύδατος μπορούν να μειωθούν σημαντικά, με την χρήση κελλίων καυσίμου.



Κελλία καυσίμου



Περιβαλλοντικά θέματα

Παράλληλα, τα κελλία καυσίμου εξαλείφουν ή μειώνουν αφ' ενός τα προβλήματα ποιότητας του ύδατος, τα οποία σχετίζονται με το απομακρυνόμενο υγρό κατά την διεργασία της θερμικής εναλλαγής για την απομάκρυνση του θερμικού φορτίου από την μονάδα ηλεκτροπαραγωγής και αφ' ετέρου την διάθεση των απορριμμάτων από τα συστήματα ελέγχου των αέριων εκπομπών ο ήπιος ηλεκτροχημικός χαρακτήρας των κελλίων καυσίμου **εξαλείφει πολλές από τις πηγές θορύβου**, οι οποίες σχετίζονται με τα συμβατικά συστήματα ατμού.



Περιβαλλοντικά θέματα

Τα **στερεά απόβλητα** τα οποία δημιουργούνται από τα κελλία καυσίμου αναμένονται να είναι μικρότερα σε όγκο, αλλά παρόμοια σε ποιότητα και επικινδυνότητα με αυτά τα οποία παράγονται από τις συμβατικές μονάδες καύσης.

Επίσης, πολλά από τα καύσιμα τα οποία χρησιμοποιεί ένα κελλίο καυσίμου είναι εκρηκτικά και μπορούν να περιέχουν τοξικές ενώσεις, έτσι ώστε η χρήση τους να δημιουργεί περιβαλλοντικές ανησυχίες και προβλήματα ασφάλειας.



Κελλία καυσίμου



Περιβαλλοντικά θέματα

Οι χαμηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις της χρήσης των κελίων καυσίμου σε σχέση με κάθε συγκρίσιμη πηγή ενέργειας η οποία βασίζεται στους άνθρακες ή το συμβατικό αέριο, επιδεικνύεται στον Πίνακα ο οποίος συγκρίνει τις εκπομπές ρύπων από μονάδες παραγωγής ισχύος, με δυναμικότητα 200MWe.

Εκπομπή	Μονάδα	άνθρακας ^b	Φυσικό αέριο	
			Συμβ. Τεχνολ.	SOFC
CO ₂	tons yr ⁻¹	1400x10 ³	695	460
NO _x	tons yr ⁻¹	1500	325 ^a	0.8 ^c
SO _x	tons yr ⁻¹	5300	10	7 ^d
Σωματιδιακή υλη	tons yr ⁻¹	500	3	2
Βαρέα μέταλλα	tons yr ⁻¹	3	0	0
Απώλειες θερμότητας	GW h yr ⁻¹	5600	2100	930 ^e

^a Η τρέχουσα τιμή είναι 60mg NO_x MJ⁻¹ καυσίμου για ισχύ παραγόμενη από συμβατικά θερμομηχανικά μέσα. Ο Οργανισμός Ελέγχου Ρύπανσης της Νορβηγίας απαιτεί τώρα επίπεδα χαμηλότερα από 26mg NO_x MJ⁻¹ καυσίμου. Εδώ, χρησιμοποιήθηκε καύσιμο 26mg NO_x MJ⁻¹.

^b Σταθμισμένος μέσος όρος για ανθρακίτη, στην Νορβηγία, όπου δεν χρησιμοποιείται λιγνίτης.

^c Βασίζεται σε 0.1mg NO_x MJ⁻¹ εκπομπής.

^d Βασίζεται σε 1.0mg SO_x MJ⁻¹ καυσίμου .

^e Ένα στοιχείο SOFC με σύστημα συμπαραγωγής δίνει απώλειες θερμότητας 465 GW h yr⁻¹.

Η μείωση των επιπτώσεων αυτών σε σύγκριση με το φυσικό αέριο κυμαίνεται μεταξύ 30% και 95%, λόγω της μεγάλης αποδοτικότητας των συστημάτων αυτών.



Κελλία καυσίμου



Οικονομικά θέματα

Η εφαρμογή της τεχνολογίας κελλίου καυσίμου εστιάζεται σε ηλεκτρικές μονάδες παραγωγής ισχύος δυναμικότητας πολλών megawatt και σε επιτόπιες μονάδες δυναμικότητας πολλών kilowatt, για εμπορικές και βιομηχανικές εφαρμογές.

Η κεντρική παραγωγή ισχύος παρέχει μία αγορά ευρέος φάσματος, που βασίζεται σε κελλία καυσίμου τα οποία συνδυάζονται με αεριοποιητές άνθρακα σε κεντρικούς θερμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής φορτίου βάσης.

Από την άλλη πλευρά, οι βιομηχανικές επιτόπιες εφαρμογές θεωρούνται σαν **εφαρμογές καταναλωμένης ισχύος "κλίμακας τελικού καταναλωτή"** (η καταναλωμένη εγκατάσταση είναι δυνατή λόγω του χαμηλού επιπέδου ρύπανσης που προξενούν τα κελλία καυσίμου και λόγω της δυνατότητας που έχουν να συντεθούν από υπομονάδες).



Κελλία καυσίμου



Οικονομικά θέματα

Το **σύστημα PAFC** είναι το πιο προηγμένο για εφαρμογές επί εδάφους, έχει όμως ένα σκληρό ανταγωνιστή για εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τους αεριοστρόβιλους. Η πιο πρόσφατη εφαρμογή του PAFC είναι στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας σε κτίρια, με επιτόπια ολοκληρωμένα συστήματα.

Το **κελλίο MCFC**, το οποίο έχει υψηλότερη αποδοτικότητα και παράγει ανακτήσιμη θερμότητα υψηλής ποιότητας, όταν χρησιμοποιείται με ένα αεριοποιητή άνθρακα σε συνδυασμένο κύκλο, επιτρέπει υψηλότερη αποδοτικότητα παραγωγής εναλλασσόμενου ρεύματος από ότι το κελλίο PAFC.

Το **κελλίο SOFC** είναι πολύ ελκυστικό για την χρήση υδρογόνου και μονοξειδίου του άνθρακα είτε από μονάδες αναμόρφωσης φυσικού αερίου με ατμό, είτε από μονάδες αεριοποίησης άνθρακα, για εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και βιομηχανικές εφαρμογές, λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας λειτουργίας του και της ανεκτικότητάς του σε μη καθαρές τροφοδοσίες καυσίμου.



Κελλία καυσίμου



Οικονομικά θέματα

Αν και υπάρχει απαίτηση σε παγκόσμια κλίμακα για την επιτάχυνση της εμπορευματοποίησης "καθαρών" μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, τα κελλία καυσίμου δεν είναι ακόμη έτοιμα για ευρεία εμπορική αξιοποίηση.

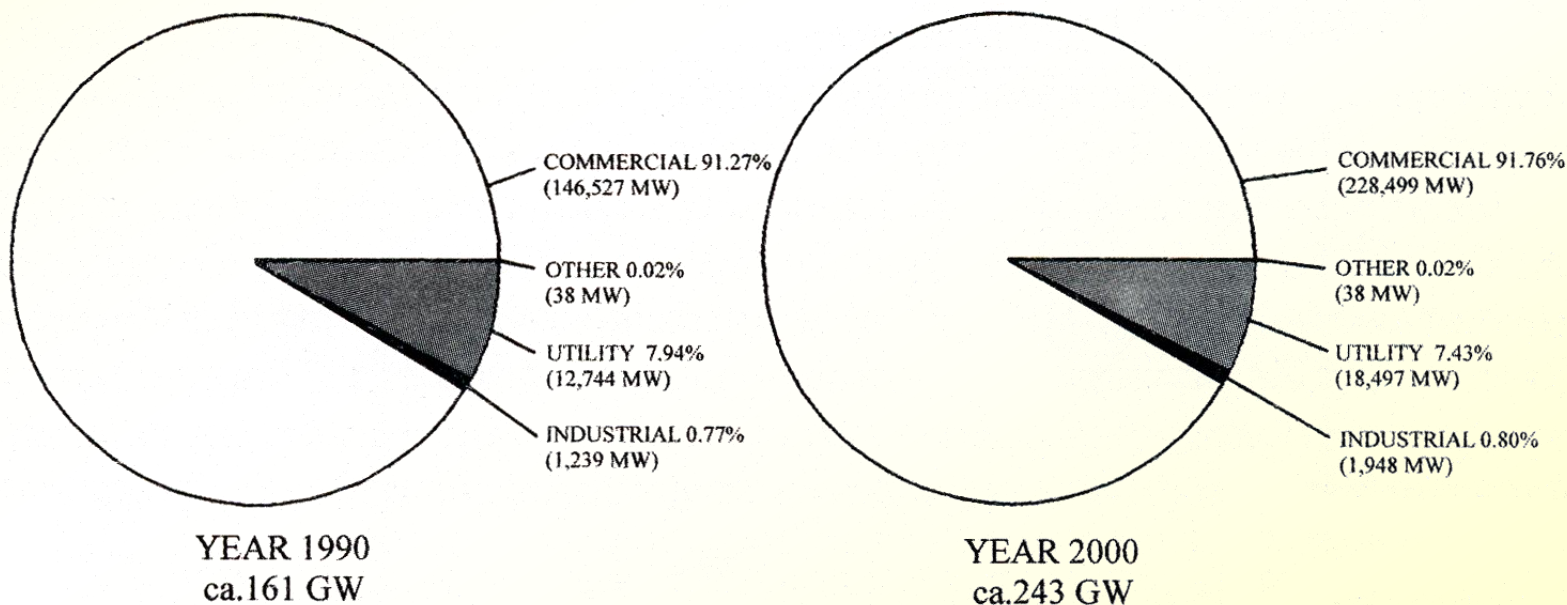
Η μελλοντική αγορά για συστήματα κελλίου καυσίμου θα καθορισθεί κυρίως από την ζήτηση συστημάτων χαμηλής τιμής, υψηλής αποδοτικότητας και χαμηλών εκπομπών ρύπων.

Τα εξαιρετικά χαρακτηριστικά υψηλής αποδοτικότητας (ανεξαρτήτως φορτίου), χαμηλών εκπομπών ρύπων, δυνατότητας σύνθεσης από υπο-μονάδες, μικρότερων χρόνων έναρξης της λειτουργίας, εύκολης επιλογής της τοποθεσίας και ο σχετικά μικρός χρηματοοικονομικός κίνδυνος, καθιστούν τα κελλία καυσίμου μία άριστη επιλογή για τις μελλοντικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρισμού και για επιτόπιες/ολοκληρωμένες ενεργειακές μονάδες.



Οικονομικά θέματα

Η συνολική αγορά για όλες τις τεχνολογίες κελλίου καυσίμου το 1990 ήταν (σε ετήσια βάση) 161.048 MW, θεωρώντας μία τιμή 1000 \$ ανά kilowatt. Ένα ποσοστό περίπου 91 % αφορούσε εφαρμογές στην βιομηχανία, και ένα ποσοστό περίπου 8% εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρισμού.



Κατανομή μεταξύ κλάδων της αγοράς για το σύνολο της παγκόσμιας αγοράς συστημάτων κόστους 1000\$ ανά kilowatt.



Κελλία καυσίμου



Οικονομικά θέματα

Στις αρχές του 21ου αιώνα, η συνολική αγορά για όλες τις τεχνολογίες του στοιχείου καυσίμου έχει αυξηθεί κατά περίπου 55%, δηλαδή σε 250.000 MW ετησίως. Όμως, η κατανομή των εφαρμογών ανά κλάδο δεν έχει αλλάξει σημαντικά.



Κελλία καυσίμου



Οικονομικά θέματα

Ο στόχος για όλα τα κελλία καυσίμου είναι η μείωση του κόστους εγκατάστασης σε επίπεδα κάτω από \$1000/kW, βελτιώνοντας έτσι την αποδοτικότητα του κελλίου και μειώνοντας το κόστος υλικών και κατασκευής.

Σύνοψη κόστους παραγωγής ηλεκτρισμού για όλα τα συστήματα κελλίου καυσίμου

Παραγωγή Ηλεκτρισμού	Τύπος Μονάδας	Κόστος Ηλεκτρισμού (\$/kWh) για διάφορους όγκους παραγωγής				
		FU	FS	LVP	HVP	RP
25 kwe	PAFC MCFC	-	0.560	0.292	0.180	0.125
		-	0.563	0.288	0.166	0.110
250 kW _e	PAFC	-	0.163	0.117	0.096	-
	PAFC ^a	-	0.181	0.137	0.120	-
	MCFC	-	0.164	0.117	0.097	-
	MCFC ^b	-	0.202	0.152	0.130	-
3.25 MW _e	MCFC	-	0.135	0.105	0.092	-
100 MW _e	MCFC	0.081	0.069	0.059	-	-

^a Εναλλακτικός σχεδιασμός.
Τροφοδοσία νάφθας.

Σε μαζικά επίπεδα παραγωγής, το κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού κυμαίνεται μεταξύ περίπου \$0.059/kWh για μια μονάδα 100MW_e και μέχρι \$0.125/kWh για μία μονάδα 25 kW_e.



Κελλία καυσίμου



Οικονομικά θέματα

Η δυναμική των κελλίων καυσίμου για απόκτηση μεριδίου στην αγορά, μπορεί να μειωθεί από **ανταγωνιστικές τεχνολογίες** οι οποίες βρίσκονται ακόμα σε εξέλιξη, όπως οι στρόβιλοι καύσης και οι συνδυασμένοι κύκλοι, καθώς και από εναλλακτικές τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας, όπως οι τεχνολογίες ηλιακής και αιολικής ενέργειας.

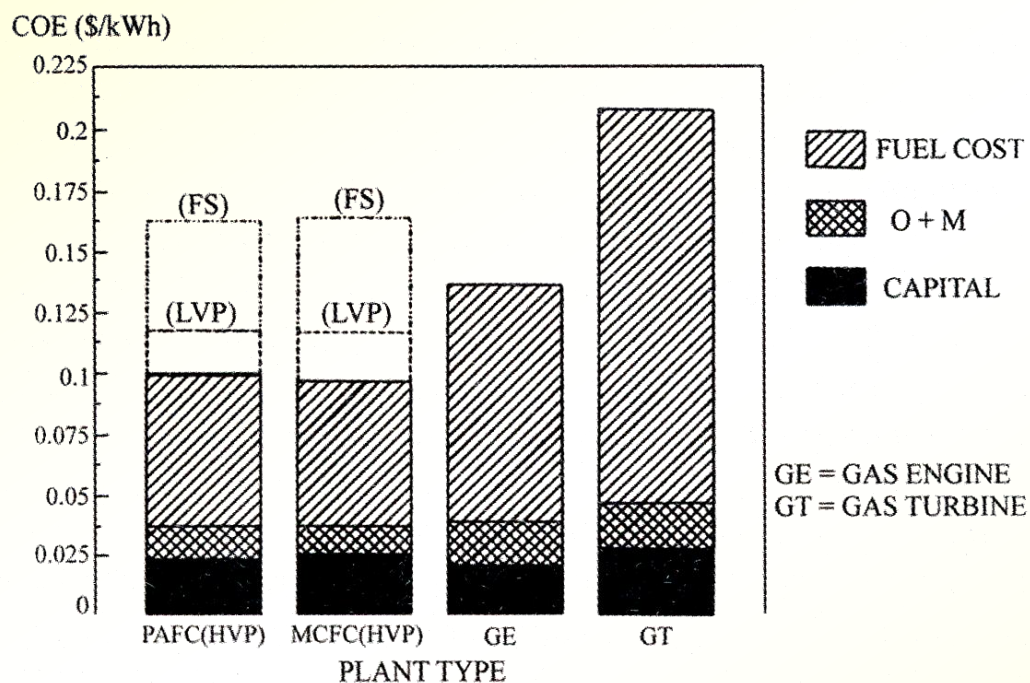
Ο σκληρότερος ανταγωνισμός αναμένεται από τα **προηγμένα συστήματα IGCC**. Οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου επιτυγχάνουν αντίστοιχα επίπεδα αποδοτικότητας και απαιτούν χαμηλότερο κεφαλαιουχικό κόστος. Όμως, οι μονάδες κελλίου καυσίμου προσφέρουν ανώτερα χαρακτηριστικά, όσον αφορά τις εκπομπές στο περιβάλλον, την ευκολία επιλογής χώρου εγκατάστασης και την παραγωγή ανακτήσιμης ενέργειας για συμπαραγωγή.

Η διείσδυσή τους στην αγορά θα εξαρτηθεί από το κόστος του συνολικού συστήματος, σε σύγκριση με αυτό ανταγωνιστικών τεχνολογιών εξοπλισμένων με μονάδες ελέγχου εκπομπών.

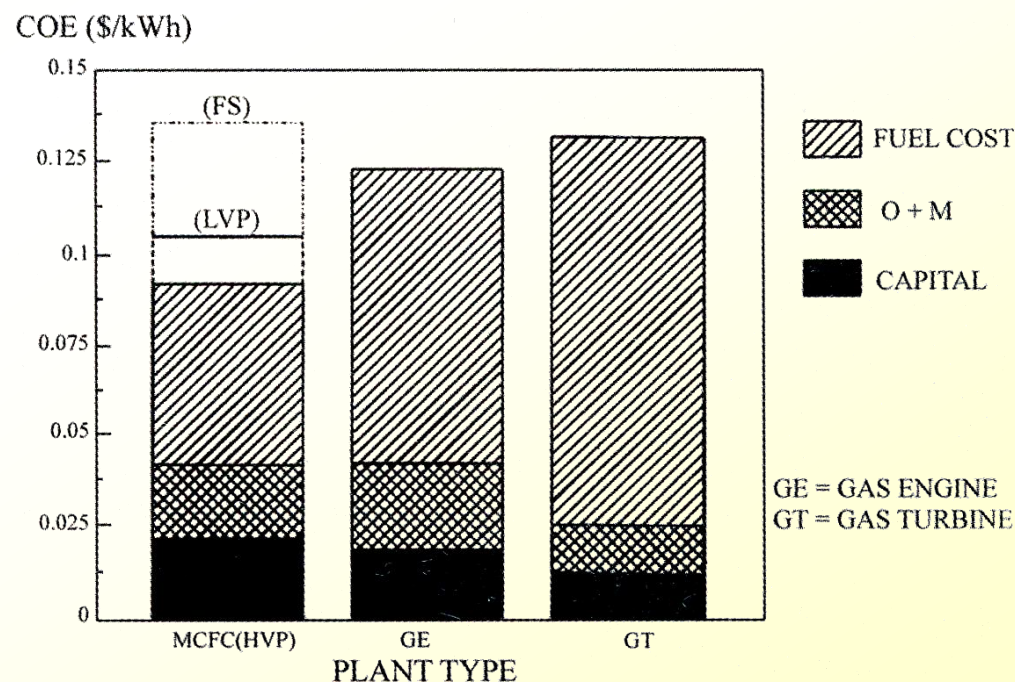


Οικονομικά θέματα

Τα περισσότερο υποσχόμενα οικονομικά πλεονεκτήματα των συστημάτων κελλίων καυσίμου, έναντι των λοιπών τεχνολογιών, γίνονται φανερά στο εύρος παραγωγής 250 kWe και 3.25 MWe, ακόμα και σε περίπτωση παραγωγής χαμηλού όγκου.



Σύγκριση κελλίων καυσίμου με άλλες τεχνολογίες για μονάδες 250 kWe.



Σύγκριση κελλίων καυσίμου με άλλες τεχνολογίες για μονάδες 3,25 MWe.



Κελλία καυσίμου



Οικονομικά θέματα

Κάτω από αυτό το όριο που είναι το κατώτερο, δηλαδή **σε μονάδες μικρού μεγέθους**, η υψηλότερη αποδοτικότητα των συστημάτων κελλίων καυσίμου έχει δυσκολία να αντισταθμίσει το υψηλότερο κεφαλαιουχικό κόστος τους, ενώ πάνω από το όριο αυτό, **σε πολύ μεγάλες δηλαδή μονάδες παραγωγής**, η επίτευξη ενός υψηλού επιπέδου αποδοτικότητας είναι επίσης δυνατή με την χρησιμοποίηση περισσότερο σύγχρονων ανταγωνιστικών συστημάτων, όπως οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου.



Κελλία καυσίμου



Οικονομικά θέματα

Επιπρόσθετα, σε εφαρμογές συμπαραγωγής, οι οποίες απαιτούν συμπαραγόμενη θερμότητα χαμηλής θερμοκρασίας ($<150^{\circ}\text{C}$) και σχετικά υψηλές αναλογίες ηλεκτρισμού προς θερμότητα (>0.7), τα κελλία καυσίμου έχουν ένα συγκριτικό πλεονέκτημα, έναντι των λοιπών τεχνολογιών.

Κατά συνέπεια, θεωρείται λογικό να περιμένει κανείς ότι τα κελλία καυσίμου θα γίνουν η πιο οικονομική και φιλική προς το περιβάλλον τεχνολογία για παραγωγή θερμότητας και ισχύος, υπό την προϋπόθεση ότι η διάρκεια ζωής τους θα αυξηθεί και το κόστος τους θα μειωθεί.