



U.S. DEPARTMENT OF
ENERGY

Fossil Energy and
Carbon Management

7-#U \ 'o 'k

- 'k 'h 'U
U . .



Legend:

- Light Rare Earth Elements
- Heavy Rare Earth Elements
- Critical Rare Earth Elements
- Critical Minerals

H	He																	He				
Li	Be																	B	C	N	O	F
Mg																	Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr					
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	Xe						
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn					
Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og					
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu								
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr								

© 2014 NRC. All rights reserved. NRC is not responsible for any errors or omissions.



: 9`hc`: 97 A`Ë5`BYk`A]gg]cb

"ÁØ[&•ã*Á}Á ãË/ÜŠÁ^&@ [|| *ã•Á[!Á^&æà[}ãæā }

"Á/!æãā }æ|`Á[&•^åÁ}Á &^æã*Á~ãā }&^Áæ åÁçdæ&ã*Á
{ æã ~{ Áæ^Á[{ Áæā }æ^Á[••ãÁ}^!|^Á[~!&^•È

"Á^, Á&ā æ^Á[æ•Á[!Á@Á[, ^!Á^&ç !K

~ÁÍ €Ã Á{ ã•ā }•Á^å~ &ç }Á^ Á€H€

~ÁF€€Ã Á&^æ Á|^&çæã Á^ Á€HÍ

~Á^dË^! [Á&æà[}Á{ ã•ā }•Á^ Á€Í €

"ÁU~ã^Á ÁØ[••ãÁ^}^!|^Áæ åÁÔæà[}ÁT ææ^ { ^} ÁØÔÔT D, Á^, Á
{ &•K

~ÁT ããæā }Á~Á}çā[] { ^} çæÁ]æ&•Á[{ Á^•[~!&^Á^&ç^!^Áæ åÁ•^Á

~ÁT ææ^ { ^} çÁ~Á&æà[}Áā çã^Á{ ã•ā }•È&~åã*Á^*æ&^Á{ ã•ā }•

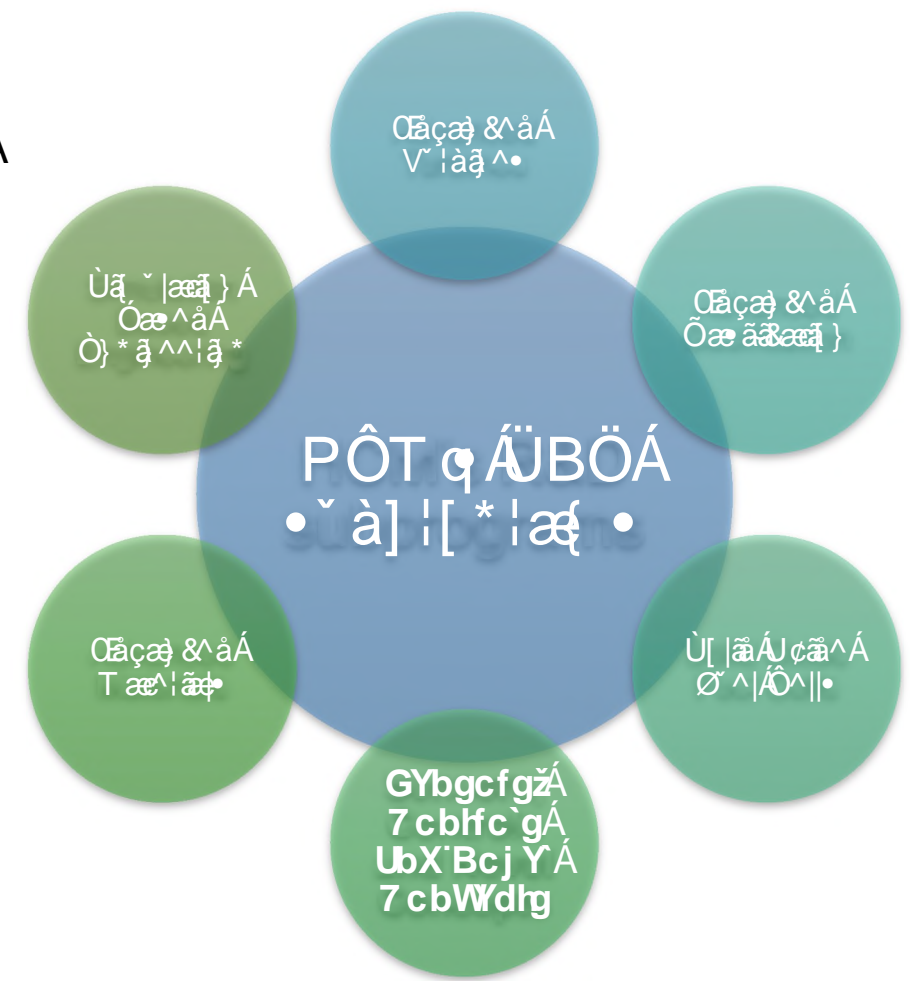
<mXfc[Yb`k]h `7 UfVcb`A UbU[Ya YbhA]gg]cb

P^ái[*^} Á ã@Ôæà[} Á æ æ ^{ ^} Á PÔT Dããã } Á c^!æ^ Áæà[} Á
 &æ c^!^ Á æ á Á d^!æ^ Á ÔÔÜDæ æãã Á ã@Ôæà[} Á ^ dæ! Á ^ d^!æ^ Á
 &æà[} Á { ã • ã } • Á &@ [|| * ã • Á æ á Á] | [ç^!á Á ^!Á & } ç^! • ã } Á ~ã } & È
 Q[& • Á Á } Á] | [çã * Á ~ã } & È & ^ æ ã * Á | æ á æ æ æ æ æ È æ á Á
 æ & çã * Á dæ! , Á { ã • ã } • Á Á æãã } æ! [|| çã • È ^ & @ Á PÔT ç Á
 !^ • ^ æ & @ Á Á æ ^ c^!á Á æ] | [çã * Á ç^!æ! Á ^ • c^! Á ~ã } & È ^ á & ã * Á
 & æ æ æ æ á Á] ^!æã * Á & • • È æ á Á } æ! ã * Á æ -! á æ! Á æà[} Á æ c^! È

Ô!^æ Á @ái[*^} Á Á ^ ã ^ á Á Á Á * Á ÔU_ ^ Ð * Á Á æ @ Á [ã á Á] [á & ç } È

: i bW]cbU`F/ 8`FYgdcbg[V]hYg`bWi XY.

"ÁÔ!^æ Á @ái[*^} Á] [á & ç } Á Á ^! Á ^ æ çã • Á @ [^ * @ Á æ æ æ æ } Á æ á Á
 Ü^ç^! • ã ^! Á] [ã Á çã ^ Á ^! Á ^! • Á ÜÈUÔÔ • D
 "Á Qã • dæ! [, ^! Á] [á & ç } Á • ã * Á @ái[*^} Á Á ç! á æ ^ • Á æ á Á ÜUÔÔ •
 "Á { æ! È [á ^! á æ æ æ æ } Á ^ • c^! • Á Á æ & ^! æ ^ Á } • d^! & ç } Á æ á Á
 !^ á & Á • ç! á Á •
 "ÁÔ æ! ã * Á & @ [|| * ã • Á ^ & @ Á Á çã & ^! Á æ ^! æ ^ Á GYbgc fg`UbXÁ
 7 cbhfc`g`æ á Á ã ^! æ } Á æ ^! Á Ô } * ã ^! á *



: 97 A B GYbgc f g/ ' 7 c b h f c ` g ' D f c [f U a

; c U . ' 9 B 5 6 @ ž C D H A = N 9 ' U b X ' D F C H 9 7 H ' 9 j c ` j] b [' ; Y b Y f U] c b ' H Y W b c ` c [] Y g

9 b U V Y A

"Á Ü^æĚā ^Á ^æ~|^{ ^} ōĚ Á c d ^{ ^| Á @ • @Ě } çā[] { ^} • Á • ā * Á [ç ^| Á ^ & @ [|| * ā •
"Á U] ^ | æā } • Ěæ • ^ ā Ě | ^ ā æ ç ^ Á æ ç c } æ & Á [Á æ ā ā ^ Ě ā ^ Á æ ā Ě æ æ ā æ ā æ
"Á Q & ^ æ • ^ ā Ě ^ ç ā ā æ Á & & ā * Ě ā æ] ā * D Ě Á ^ • [] ā Ě Á æ ā | ^ Á @ æ * ā * Á [æ ā Ě ^ { æ ā Ě ā Ě ā [| • c ^ Á | ā Ě Á
• æ ā ā æ
"Á Y ā ^ •] | ^ æ ā • ^ Á Ě ^ , Ě ^ æ Á ^ } ^ | æā } Á ^ & @ [|| * ā • Á Ě Ě Ū Ū Ū Ū • Ě ^ & Ě

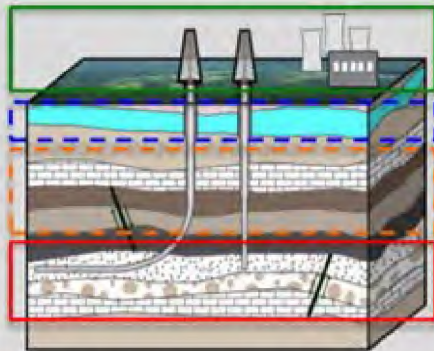
C d h a] n Y A

"Á Ú | æ ç Á ~ ā } & Á æ ā Ě @ æ Ě æ Ě ā ā ç æ & ^ ā Ě [] d [| Á æ ā Ě ā æ } [• ç ā ^ c @ ā •
"Á Ü ^ } • [| Á æ æ ā ā æ Ě | æ & { ^ } d Ě ā ^ Á æ ā Ě æ ~ æ ç | æ ā ā æ
"Á T æ ç c } æ & Á | æ } ā * Á Ě Á ^ ā ^ & Á }] | æ } ^ ā Ě ^ æ ^ •

D f c h Y W A

"Á Ú | æ ç Á ~ ā { ^ } ōĚ ā Ě æ æ ā ā æ Á ^ Á } • | ā * Á ^ } • [| Á æ æ Ě [] d [| Á ^ • c { Ě æ ā Ě ^]] | ^ Á @ æ Á ^ & | æ Á
, ā @ & æ * Ě ā * ^ Á ^ ā ^ Á ^ & @ [|| * ^

: 97 A 'GYbgcfcg/ '7 cbhfc`g'5 dd`]WUhc bg



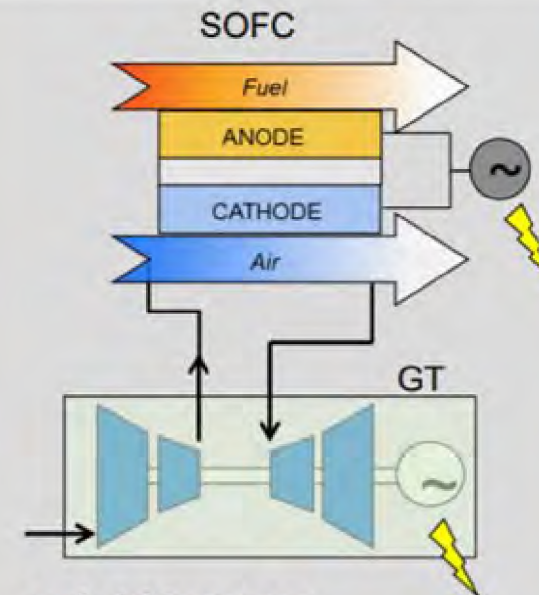
Carbon Storage and Subterranean chemistry

- Assure CO₂ storage stability
- At the Wellhead
- Downhole
- High pressure water or brine



Hydrogen Production and Utilization

- Thermal gasification 1100 - 1500°C
- Microwave fuel reforming
- Chemical Looping
- Hydrogen GT
- SOFC/SOEC
- Ammonia systems



Hybrid Systems

- 800°C in fuel cell
- 1500°C in GT
- Transient controls
- + Storage or polygen



Novel Systems

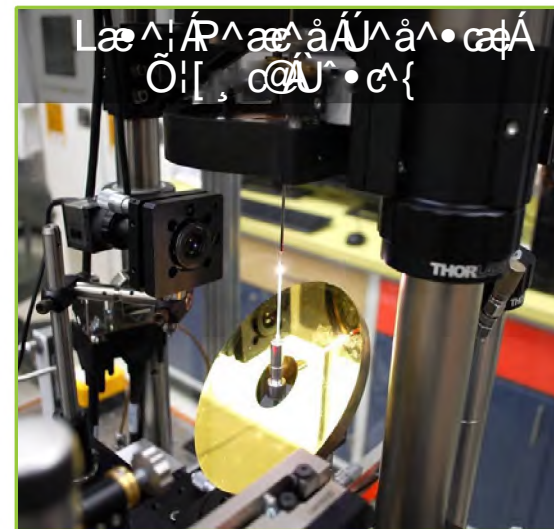
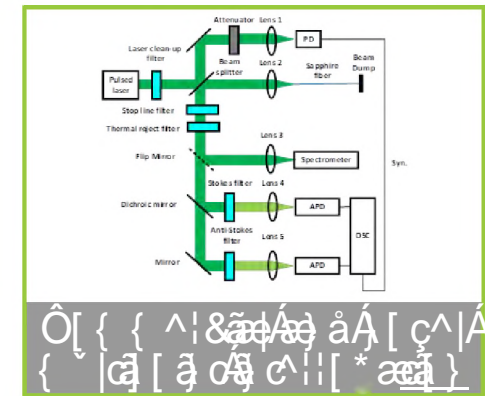
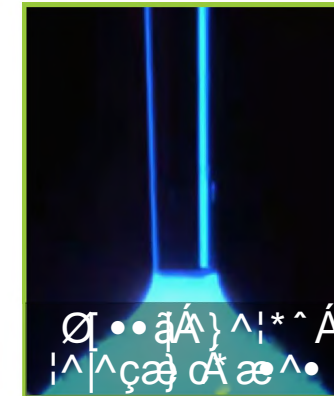
- Direct Air Capture
- Supercritical CO₂ cycles
- FE + storage
- FE + biomass
- FE + plastics

CdHjWU': jVYf'GYbg]b['Zcf'<Ufg\ '9bj]fcba Ybhg

"ÄÖ^ç^[[] Ä æ^|æ•Ä} åÄ
 { ^cQ å•Ä[|Ä] ææ||^ Ä^•[|ç^åÄ
 [] ææÄ~^|Äæ^åÄ^}•ä*Ä
 ~} å^|Äæ• @Ä[} åää }•Ä
 Qì €€»ÔD

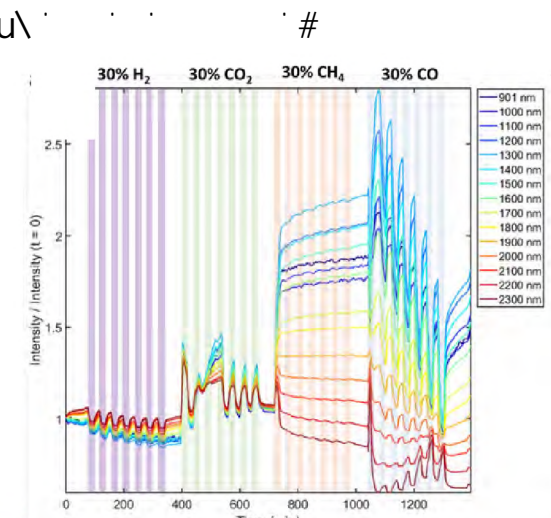
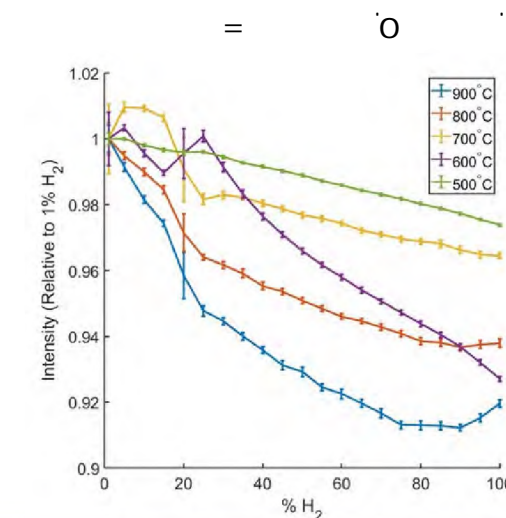
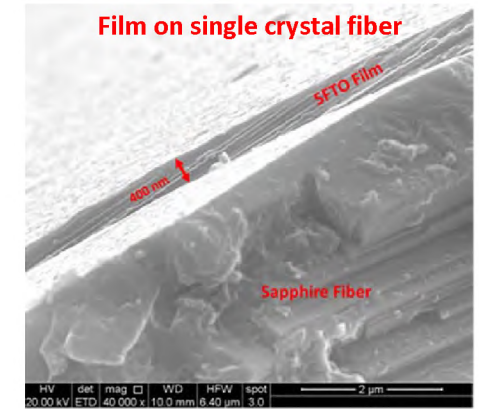
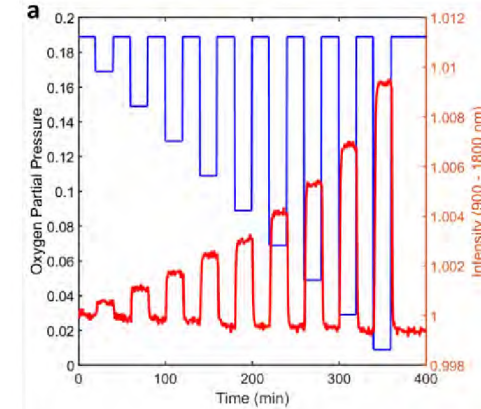
"ÄÖ^ç^[[] Ä[, È[•c~ } &c~ } æÄ
 & æä * Ä•ä * Ä] ~ c~|ä * Ä} åÄ
 åä Ä[æä * Ä ^cQ å•

"ÄÖ^ç^[[] Ä&[] { æÄæ|ææ } Ä
]| [&••Ä[|Ä~|æ|Ä] ææ||^ Ä
 &æÄæ } @^Ä~^|Ä} åÄ
 ä c~|| [* æä } Ä^•c{



CdHjWU : jVYf GYbgjb['Zcf' < Ufg\ '9bj jfcba Ybhg'f7 cbHŁ

"ÁÔ[{] | ^ c a Á • cā * Á Šæ ù! Vā Á
 • ^ } • ā * Á æ ^ | Á } Á ā * | ^ Š ^ • cā Á ā] @ Á
 ā ^ !
 "Á F F E E ã Á P æ Á E E E Á Ô Á } a ^ | Á æ à ā } á
] | ^ • • ^ | ^
 "Á Ô | [• • E ^ } • ā ā ā Á Á Ō U Ě Ō P Ě ā ā Ō U
 "Á Ô [{] | ^ c a Á [Á | æ Á ā • & ā • Á
 ā ^ • & ā ā * Á ^ { [] • d ā ā } Á Á ā * | ^ Š ^ • cā Á
 ā ^ | Á ^ } • [| • Á | Á æ Á ^ } • ā * Á æ Á ā @ Á
 c {] ^ | æ | ^ Á E E F E E E Á Ô D
 "Á W j & { ā * Á [| | K [] | [c ^ Á ^ | ^ & ā ā Á ā
 • cā ā ā Á @ [~ * @ Á | [c & ā ^ Á c ^ | & ā ā | ā Á
 c • ā *

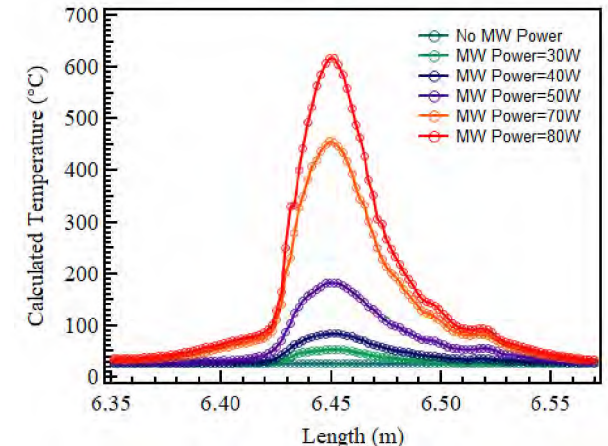
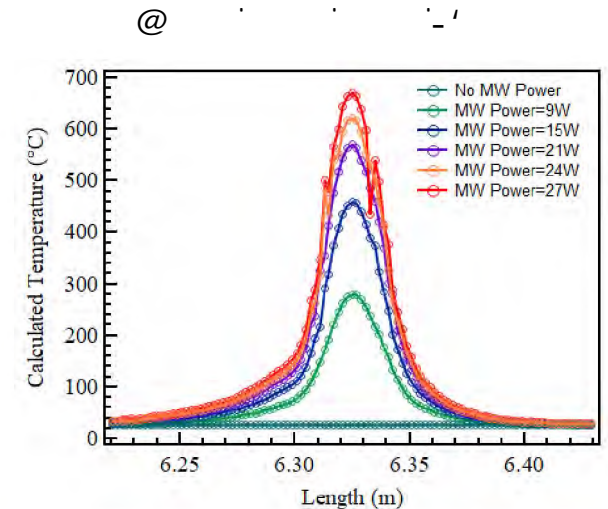
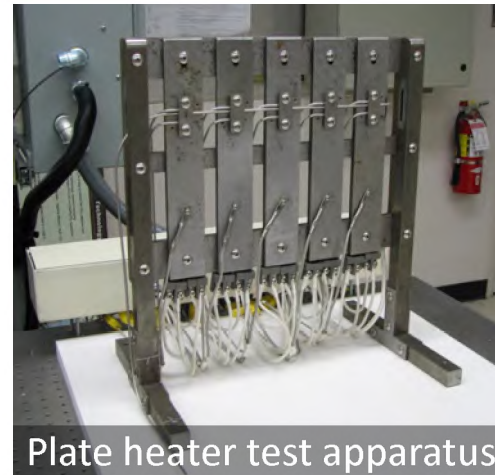


CdHjWU': jVYf'8 jghfjVi hYX'HYa dYfUhi fY'A YUgi fYa Ybh

"Á/^•óã dã~ c'ãÁ{]^|æ~|^Á
 { ^æ~|^ { ^} óã @Á] cãæÁ
 ~ã^|

"ÁÖj]|^ Á] cãæÁã^|Á
 c' {]^|æ~|^Á ^æ~|^ { ^} c'Á
 ð Á ÒVŠÁ æ[, æ^Á^æ& d |Á
 ~æãã ÁÜ^ÖÖVD

"ÁÖ^•ã } Áæ ãÁ& } •d~ &óã @|^Á
 •] æãæÁ^• [| cã } Á
 c' {]^|æ~|^Á ^æ~|^ { ^} óÁ
 ~ } ã



F Ua Ub ; Ug 5 bUmYf fF ; 5 L

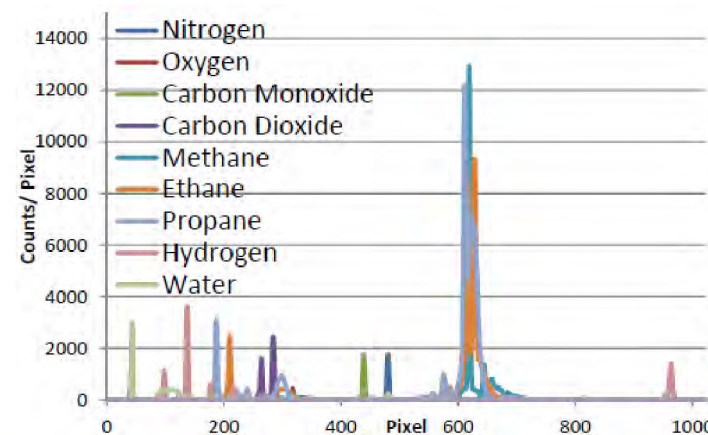
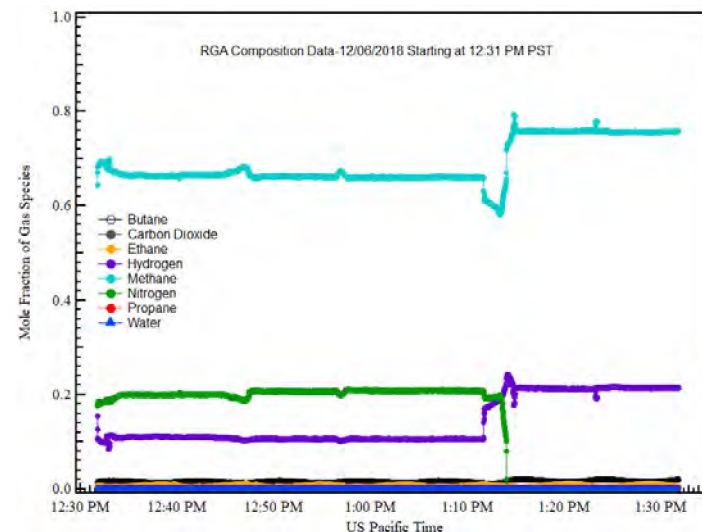
"ÁÚ[* |æ Áæ áÁ•Á
 •{ æ^|Á|[d c] ^Á
 & } •d~ &c áÁ ÁÖYGFÁ
 æ áÁ | ^] æ^Á[|Áá |áÁ
 c•cá *

"ÁQ^} cá Á]] [|č } áá•Á
 { |Á & ^{ ^} cáÁ
 á] | [c ^{ ^} • Áæ áÁ
 ááçæ & Á@ÁÜS

"ÁÜ~]] [|Áá |áÁ•cá * Á
 æ áÁ } É á Á•^Á Á@Á
 ÜÖÖÁæ áÁ & @Á
 dæ • ^ | Áæcá áá•



yoh
 V-uO 'h



"ÁQ[|áá } •Á Áck Á
 WUVcb'dck YfÁ
 [YbYfU]cb'cÉ É
 @á[* ^} Á | ^} áÁ
 c | àá ^•D

"ÁÚ[d c] ^Á•c áÁ Ááí á
 • & æ^ Áá [|æ | ^ Á
 æ] |áá } •

"ÁÖæ ÖÁÁ ^ & } áÁ
 { ^æ ~ | ^{ ^} áá ^

"ÁÜ ^ & á Á } & ^} áá } •Á
 { ^æ ~ | ^ áÁ ÁÁÁ

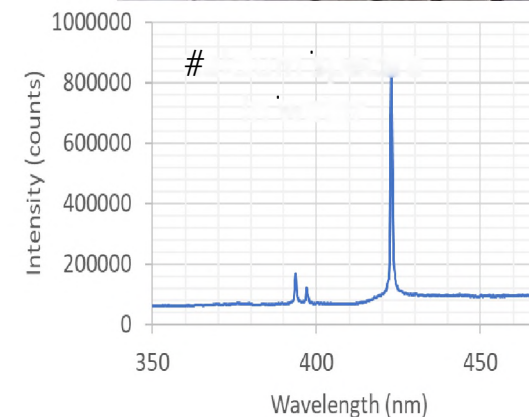
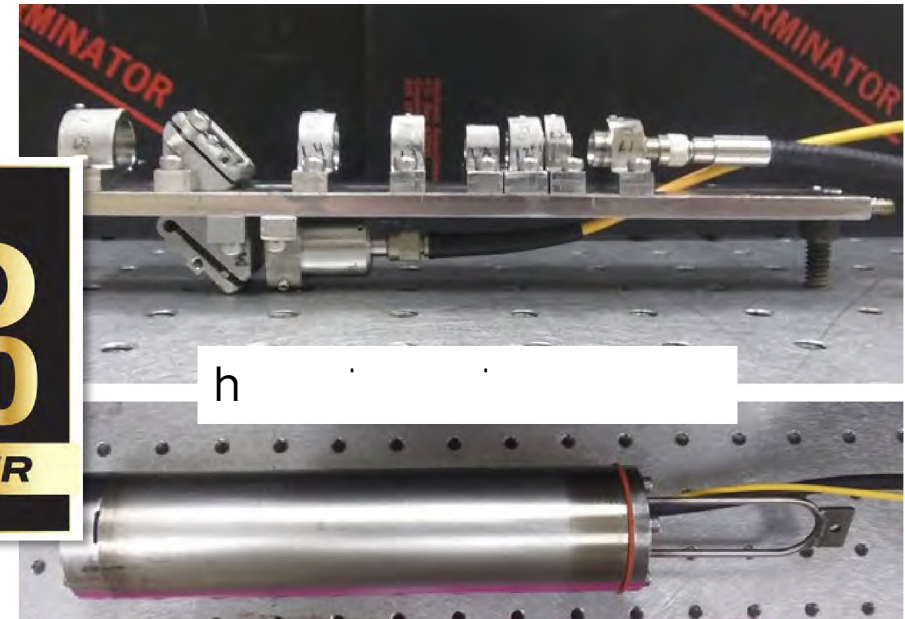
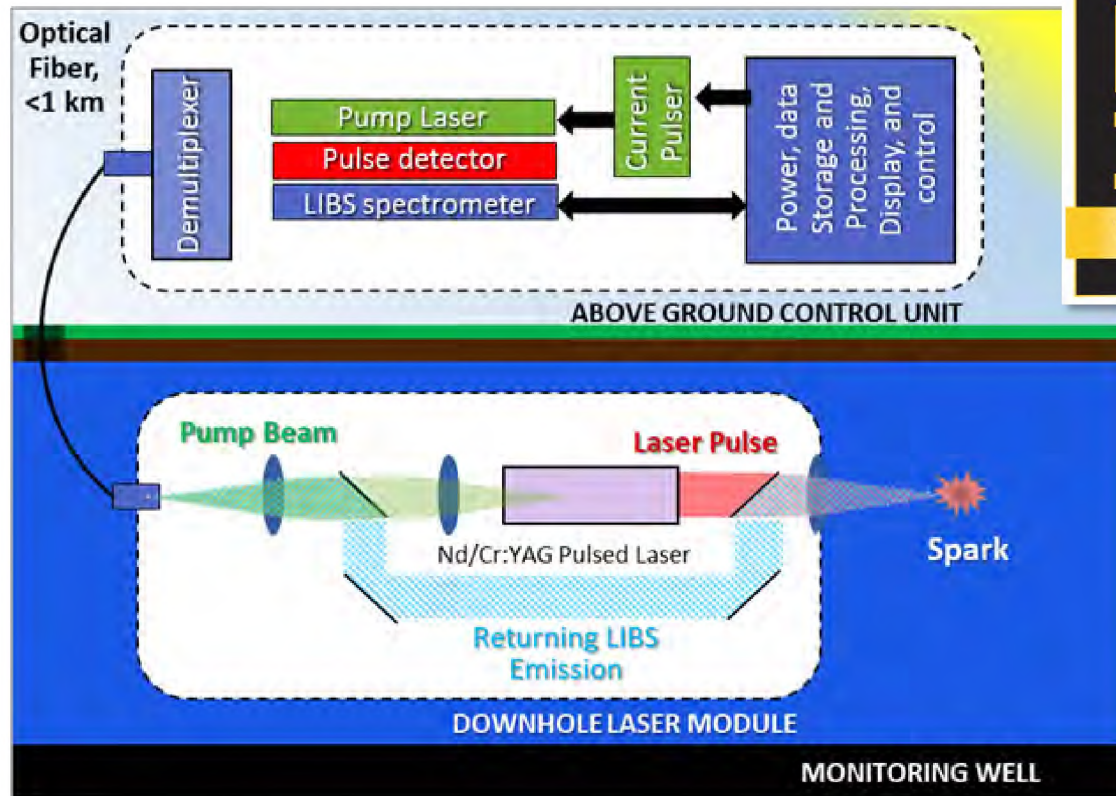
"ÁÜ] cáá áæ ^ * áá Á
 c & @ [| , * ^ Á [| • Á
 Üæ æ á á } áÁ [| ^ Á
 @æ ÁÉÉÉY

"ÁP[^ Á & áá | áá } Á
 } ^ á á á Á [| { áÁ
 [] ^ | áá } ^

" 9M&% F UW 'a ci bhÁ
 XYg[b'Vcbgfi WYX

@6 G'Zcf 'Gi VhYffUb YUb 'GYbg]b[

"Ä^ç^|[] { ^} dÄ] cä ä æä } Ää äÄ^•cä * Ä ÄÄ
 ä^|[] ^æä^Ä ä ää |ä^äÄÖÜÄ^•c{ Ä |Ä
 •~ àc||ä^ä Ä@{ ääÄ^}•ä *



J]g]V'Y' @[\ \ h7 ca a i b]Wu]cbg'fU @7 L# @! :]'UbX'GYbgc'fg'Zcf'GYW fYŽK]fY'Ygg'5`hYfbU]j Y

"Ä^ç^[[] Ä [!^Ä^& !^Ä^& } æ^Ä^ ÄÜÖÄ [{ { ~ } ææ } Ä [!Ä^ } • [! •

"Ä!æ • { æ^!Ä^ äÄ^& æ^!Ä^ Ä^ • ç *
 "Ä^Ä^æ^Ä^ [, ^!Ä^ÖÖÄ^æ^äÄ^ • ç {
 "Ä [~ } çäÄ^ } ç Ä [! • Ä^] ææ^äÄ^ Ä^Ä^æä • Ä^ } Ä^ÖVŠÄ æ
 "Ä^æ^!^Ä [, ^!äÄ^ æÄ^ [|æÄ^&æ^*^

"Ä^ææÄ^ [|^&ç } Ä^ Ä^çæ^ æ^Ä^ ^æ@!Ä^] æ&c



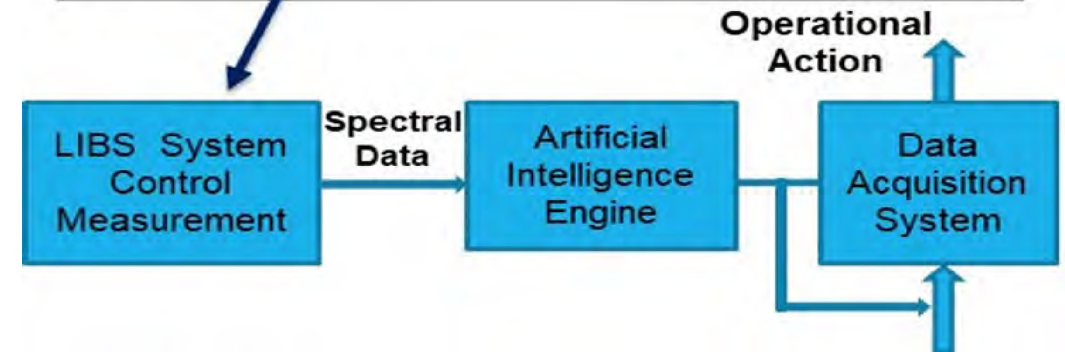
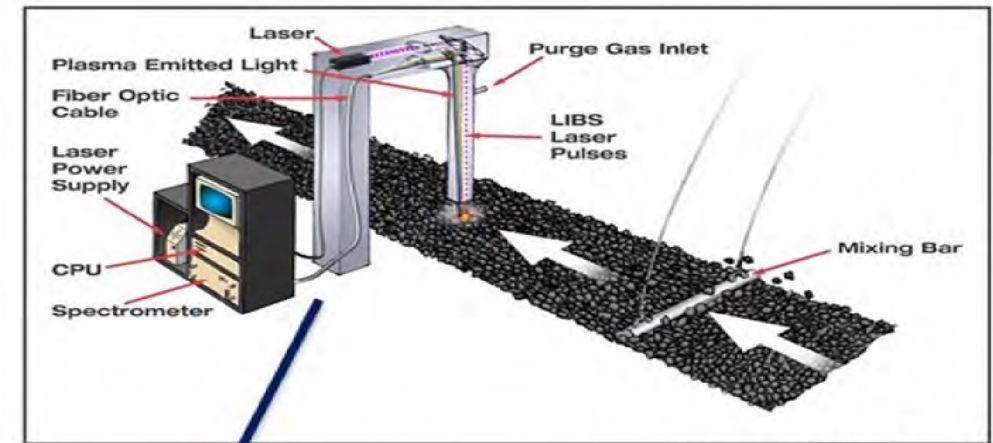
9l HfUa i fU`Dfc^YWh!`89!: 9\$\$' &%++`È @^ \ \ `l b]j Yfg]hm

Dfc^YWhCj YfU``; cU

"Á OE•^••Á@Áæ ããã Áæ àÁ[c} cãÁ Á•ã * Áæ^!Á
 Qã~ &ãÁ^æã[, } Á] ^&d[•&] ^ ÁŠÓUÁã \ ^ãÁ Á
 OEãããÁQc||ã ^} &È æ&Q ^ ÁŠæ} ã * ÁQÖT ŠDÁ!Á
 !^æÁã ^ Áæ àÁ Éã Á&@{ ãæãæ æ•ã Á Á æcÁ
 { æ^!ã Áã { æ•É æcÁ|æã Áæ àÁ* æ& Á& æÁ
 , æcÁ Áæã æ^ Áæ àÁ Á^} à• Á Áæ c^!• Á Á
 @ã[* ^} Á[| á &ã } Áæãã!Á] ^!æ]•È

DfcdcgYX`5 ddfcUW

"Á V^&@ [[^* Á ã!æ [, ÁUd]XZ]b!g]h `W UfUWYf]nU]cbÁ
 [Áæãã!Á^ã•d & É! [çãã * Áããã&@æc^!ã æã } Á
 àæã Á ã c•Á!Á& } çã [^•&] ~ã{ æã } Á Á
 ^ãã•d & Á] ^ãããã } • Áæ àÁ dchYb]U`ZYX!Z`fk UfXÁ
 dfcWgg`Wb]fc` [Á [, } •d^æ Á@ã[* ^} Á[| á &ã } È
 "Á V@Á [^!ãÁ] ^•^} óÁ i bXfYX!Z`X`ja dfcj Ya YbhÁ
]b`h Y`ZYXg]cW`W UfUWYf]nU]cb`h fci [\ di HÁ ç^!Á
 &!!^} ó ^cQ à• Á Á!æãæ]|ã * É& {] [•ãã * Éæ àÁ
 &•d^ Áæã!æ] ^ Áæ æ•^•È



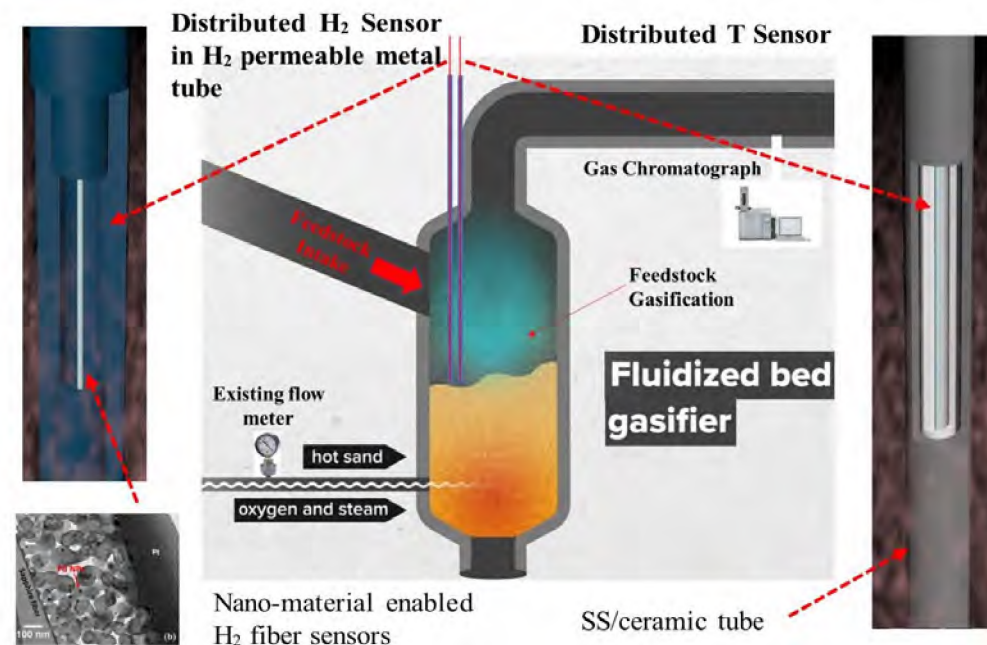
9l hfUa i fU`Dfc^YWh!`8 9!: 9\$\$\$' &&/%\$`È 'D]hgVi f[\

Dfc^YWhCj YfU``; cU

"Á V@Á[b&Á^^\•Á Á^ç^[] Áã dã~ ¢áÁã^!Á^}•[!•Á
 ¢ Á^!f[] Á^æÉã ^Á^{} ^!æ~!^Á^ ¢á@á[] *^} Á
 &[] &} ¢æã} Á ^æ~!^{} ¢ Á Á[] [ç^@á[] *^} Á
 [] [ã &ã} Á ¢á} ^!^ Á~ã} & Á Á æ ¢ Á|æ ¢ Á
 * æãæã} Á [&••^•ÉV@Á^æ Á áÁ^{} [] • ¢æ^Á^}•[!È
 ^} æ|á^æãæã} Á] ¢ã æãã} Á [&••^• ¢á^á^ & Á
 @æ{ ~|&@{ æã^} ^!æã} È

DfcdcgYX`5 ddfcUW

" : Ya hcgYwbX`UgYf`X]fYWhk f[h]b[`¢&@ã~^•Á ÁUf]WUyÁ
 ghUV`YUbX` mKfc[Yb!fYg]ghUbhgYbg]b[`ZVYfg', æ@Á ¢[] * Á
 Üæ|á @áæ&•&æã} ¢ Á [¢•Á| Á Éã Áã dã~ ¢áÁ
 ¢{ } ^!æ~!^Á ^æ~!^{} ¢ Á • Á^Á^æãæã} Á^æ ¢ È
 "Á Ö^ç^[] Á X]gh]Vi hYX`ZVYf`@á[] *^} Á^}•[!•Á| Á Éã Á
 { [] æã} ¢ Á^@á[] *^} Á [¢ &ã} Á • Á^Á^æãæã} Á
 |^æ ¢ Á æ@Á!Wá`gdU]U`fYgc`i h]cb`ã~! ¢ Á@ Á
 * æãæã} Á [&••È



9I IfUa i fU`Dfc^YWi!'8 9!: 9\$\$' % &* `E7`Ya gcb'I b]j Yfg]hm

Dfc^YWiCj YfU``; cU


"Á V[Á^•ã } Êãããã^| Á æ ~ æç | ^Êãããã^•ã@Á
 &ã&{ ^|^} cã^ Á • cã^ãÁ^} • [| Á [ã ~|^•Á | Á Áã Á
 { [] ã [ã * Á@Á^ {] ^|æç | ^Ê | ^•• ~|^Áãããã^ã Á
 ç ã * Á Á ã ã ã ^•È








DfcdcgYX'5 ddfcUW




" 8 Yg[[b [] cãã^ {] ^|æç | ^Ê | ^•• ~|^Êãããã^ã Á
 ç ã * Ê^ææ & Á^} • [| Á [ã ~|^•
 "Á Ö^ç^ [] Á | [&^••^• Á ÁUX[h] Yma Ubi ZUWi fY^c@Á
 ã^•ã } ^ãÁ] cãã^ {] ^|æç | ^Ê | ^•• ~|^Êãããã^ã Á
 " HYghUbX'j U]XUW^c@Á] cãã^ {] ^|æç | ^Ê | ^•• ~|^Êãããã^ã Á
 `UVcfUrcfm•ã ~|^æç | ^Ê | ^•• ~|^Êãããã^ã Á
 " HYghUbX'Yj Ui UH^ ^| { | { æ & Á Á@Á] cãã^
 •^} • [| Á [ã ~|^• Áb'Ub]bXi gh]U`gWUY`HYghZUW]hm



@YUfb'AcfY'UVci h: 97 A 'G/ 7 'Dfc^YWg

 Sensors, Controls, and Other Nov x +

   https://www.netl.doe.gov/carbon-management/sensors-and-c...    

   Type in project number or topic

About Research and Programs Business Education Library News and Events

SENSORS, CONTROLS, AND OTHER NOVEL CONCEPTS

[@q • KQ , , È ^qÈa\[^È* \[çÈ&æà\[} È æ æ* ^{ ^} dÈ^} • \[| • Èæ åÈ&\[} d\[| •](#)

U|Á] ^ÁbÒVŠÁ^} • [| • Áæ åÁ&[} d[| • +Á ç ÁÁ ^æ&@Á } * ã ^

Gi a a Ufm

“Â[} cã ~ ã * Á[Á æ ^ Á[[* ! ^ • • Á[} Á ^ ^ Á ^ } • ã * Á ^ & @ [[[* ã • Á[! Á
ØØÔT Á[] | ã æ ã } •
“Á Ò & [] { ã æ ã ã Á[à ~ • Á[] cã æ ã ã ^ ! Á[! { ~ | æ ã } • Á[] ã Á ^ æ ~ ! ^ { ^ } Á ^ • Á { •
“Á Ö ^ ç ^ [] { ^ } Á[^ & [{] æ Á[[ç ^] ^ • Á[! Ä æ æ Á æ Á æ æ : ^ ! Ê Š Œ Ò Û Ê X Š Œ
“Á W d æ æ Á æ ^ ! Á ^ æ ~ ! ^ { ^ } Á ^ & @ ã ~ ^ • Á[! Á ã d ã ~ ç ã Á æ ð {] Á ^ } • ã *
“Á W ã ~ ^ Á[] d [| Á d æ ^ * ã • Á ^ ã * Á ^ ç ^ [] ^ ã Á[Á æ & ^ ! ^ ! æ ^ Á
ç ^ & @ [[[* ^ Á ^ ç ^ [] { ^ } Á[] ã Á[, Á[! Á[] d [| • Á[] ! [ç ^ { ^ } Á[Á
} ^ , Á[! Á ç ã ç ã * Á æ ã ã ã •
“Ä ^ ç ^ [] ã * Á ^ ç ð Ë ^ } ^ ! æ ã } Á ^ } • ã * Á ^ & @ [[[* ã • Á • ã * Á ~ æ ç { Á
• ^ } • ã * Á[] ã Á æ & @ ^ Á ^ æ } ã * Á[] ! [æ & @



U.S. DEPARTMENT OF
ENERGY

Fossil Energy and
Carbon Management

E H i \ Y U p b h _] c M p c g i 3

Ò } ^ ! * ^ È [ç Ð ^ & {

@ [• K ⊕ , , È ^ d È [^ È [ç Ð æ à [} È æ æ ^ { ^ } d Ð ^ } • [! • È æ à È & { } d [| •



Legend:

- Light Rare Earth Elements
- Heavy Rare Earth Elements
- Critical Rare Earth Elements
- Critical Minerals

										Light Rare Earth Elements										Heavy Rare Earth Elements										Critical Rare Earth Elements										Critical Minerals																			
H																	He																																										
Li	Be																	B	C	N	O	F	Ne																																				
Mg																	Al	Si	P	S	Cl	Ar																																					
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr																																										
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	Xe																																											
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn																																										
																		Fr	Ra																	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr									

*For NRC Light REE: only shows REE. **Indicated with asterisks (*)

