

القدرات الكامنة لدى الدول العربية المنتجة للنفط للإسهام في اقتصاد الهيدروجين

د. فيصل الحميدان، باحث علمي، مركز أبحاث البترول، معهد الكويت للأبحاث العلمية
د. مأمون عيسى حليبي، مستشار

- الحالة الراهنة للتحول نحو اقتصاد الهيدروجين في العالم
- التوصيات المتعلقة بدور الدول العربية المنتجة للنفط والغاز في هذا التحول

الملاح العامة للتوجه العالمي نحو اقتصاد الهيدروجين

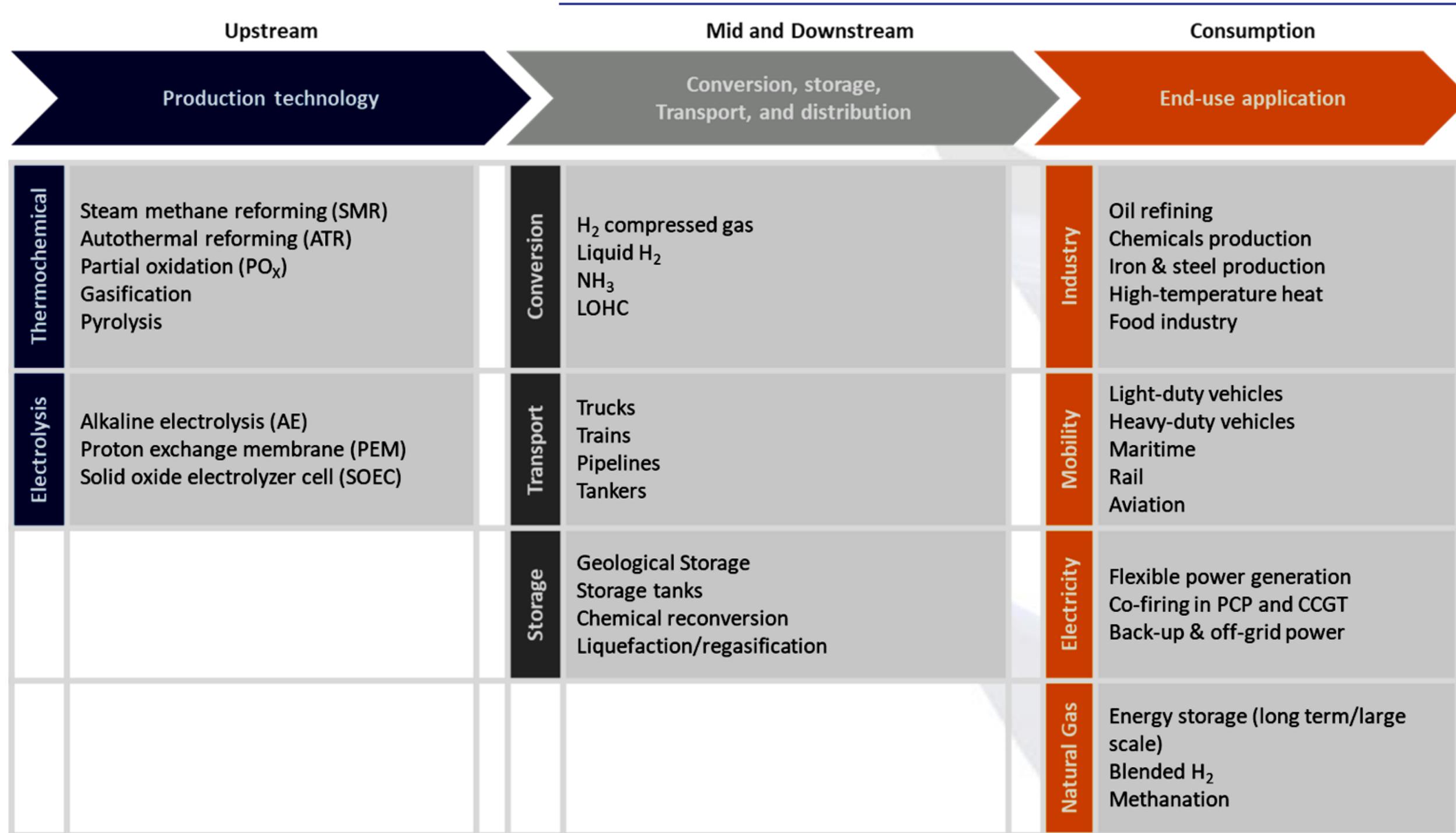
- ✓ قامت ما يقرب من 30 دولة بتطوير سياساتها واستراتيجياتها المتعلقة بالهيدروجين، إضافة إلى تطوير بعض خرائط التنفيذ وتضم الجهات الفاعلة الرئيسية: الولايات المتحدة والصين والاتحاد الأوروبي وألمانيا وفرنسا وإيطاليا وهولندا والمملكة المتحدة واليابان وكوريا الجنوبية وكندا وشيلي وأستراليا). كما تعمل الهند ودول أخرى تعمل على تطوير سياساتها.
- ✓ بالنسبة لدول مجلس التعاون الخليجي والشرق الأوسط وشمال إفريقيا، هناك عدد من المواقف الإيجابية وبعض المبادرات بما في ذلك صياغة استراتيجيات من قبل المملكة العربية السعودية والإمارات العربية المتحدة وقطر وعمان ومصر والمغرب
- ✓ بدأت عدد من شركات النفط الدولية وشركات النفط الوطنية بالتخطيط أو المشاركة بنشاطات مرتبطة بتطوير اقتصاد الهيدروجين وتشمل هذه الشركات: BP، Shell، Total، Chevron، Sinopec، أرامكو، سابك، Petronas، و Reliance
- ✓ هناك ما يزيد عن 200 مشروع حتى عام 2030 في مراحل مختلفة: تشمل مشاريع تم تحقيقها أو التخطيط لها أو الإعلان عنها، وتقدر الاستثمارات المحتملة بما تزيد عن 300 مليار دولار أمريكي. ويحظى إنتاج الهيدروجين بالحصصة الأكبر من هذه الاستثمارات

الملاح العامة للتوجه العالمي نحو اقتصاد الهيدروجين (2)

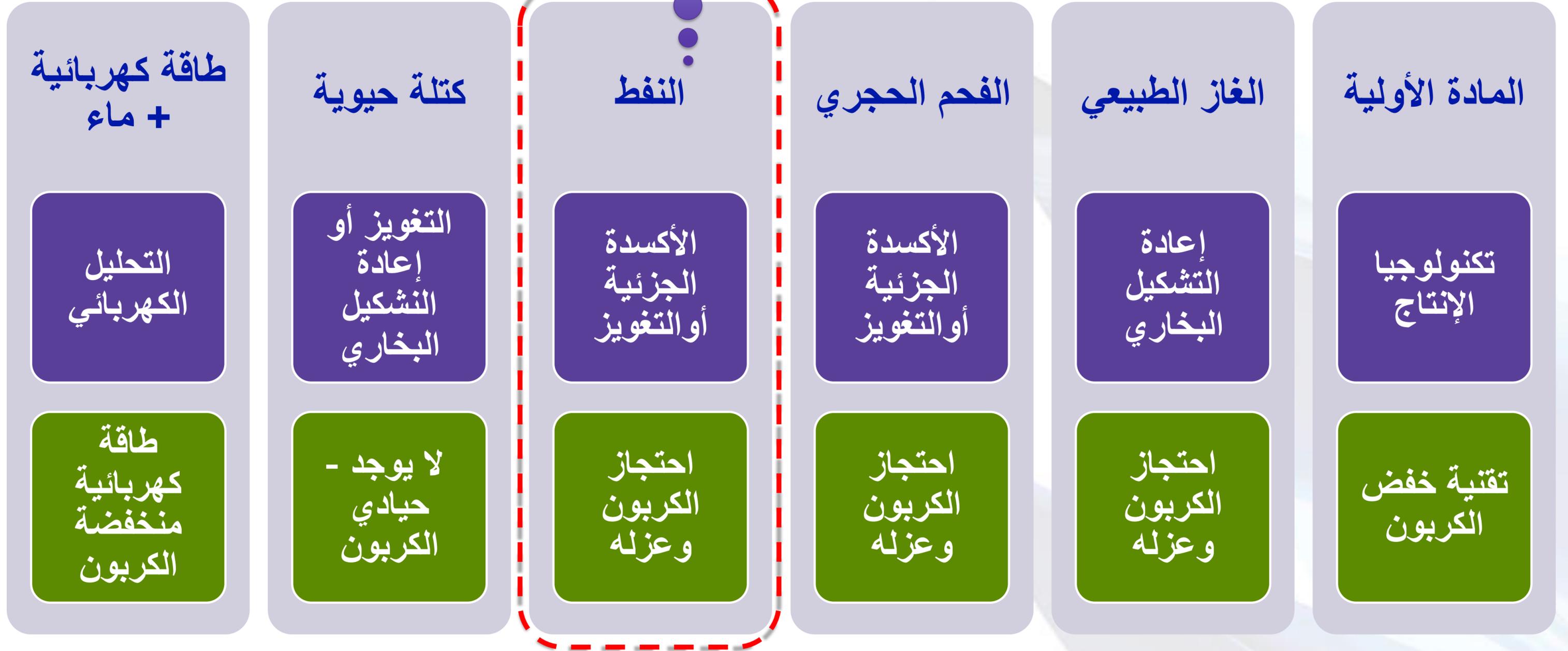
- يستهدف اقتصاد الهيدروجين تحقيق ما يقرب من 15% من إجمالي الطلب العالمي على الطاقة بحلول عام 2050. ويتطلب ذلك معالجة العديد من التحديات التكنولوجية والاقتصادية المتعلقة بكافة جوانب سلسلة القيمة الكاملة: الإنتاج والنقل والتوزيع والتطبيق
- يركز الإنتاج على الهيدروجين الأخضر ولكن الهيدروجين الأزرق (باستخدام الغاز الطبيعي والفحم ككقيم) سيلعب دوراً رئيسياً على المدى القصير و المدى المتوسط. وتجدر الملاحظة أن إنتاج الهيدروجين الأزرق القائم على البترول ليس على جدول الأعمال !!
- يتضمن الطلب والتطبيقات المتوقعة للهيدروجين العديد من المجالات وتشمل توليد الطاقة الكهربائية ومتطلبات التسخين للصناعات كثيفة الطاقة (كصناعة الفولاذ والأسمنت) والنقل (المركبات والشاحنات والقطارات والطائرات والسفن)

مشاكل وتحديات التحول نحو اقتصاد الهيدروجين

- يواجه إدخال الهيدروجين في نظام الطاقة العالمي العديد من التحديات والمشاكل المعقدة والصعبة، على عكس ما كان عليه الوضع بالنسبة للطاقة المتجددة منذ عقدين. وتشمل المشاكل والتحديات كافة مكونات سلسلة القيمة:
- طرق الإنتاج: هناك مجموعة متنوعة من المواد الأولية وتقنيات إنتاج، إضافةً إلى عدد من التقنيات الواعدة التي لا تزال في مرحلة التطوير، وعدد آخر من التقنيات الغير قادرة على المنافسة اقتصادياً، وتشمل هذه الأخيرة بشكل خاص طرق إنتاج الهيدروجين الأخضر
- التخزين: وتتوسع هذه الخيارات مع الحالة الفيزيائية للهيدروجين (غاز مضغوط أو مادة سائلة) أو تخزينه كمواد كيميائية غنية بالهيدروجين على سبيل المثال كأمونيا (NH_3) أو مركبات هيدروكربونية (C_mH_n)
- النقل والشحن: وتتضمن خيارات متنوعة وكلها تتطلب مزيد من التطوير. وتشمل الشحن من منطقة إلى أخرى من العالم، والشحن عبر الدول، والنقل من مراكز التخزين المركزية إلى مراكز التوزيع ومن مراكز التوزيع إلى المستهلكين
- التطبيقات: هناك العديد من التطبيقات التي تم تفعيلها ولكن بنطاق محدود للغاية (ومن ذلك قطاع النقل، وبعض الصناعات الثقيلة، وتوليد الطاقة المركزية والموزعة)؛ وبعض التطبيقات التي لا تزال في مرحلة التطوير

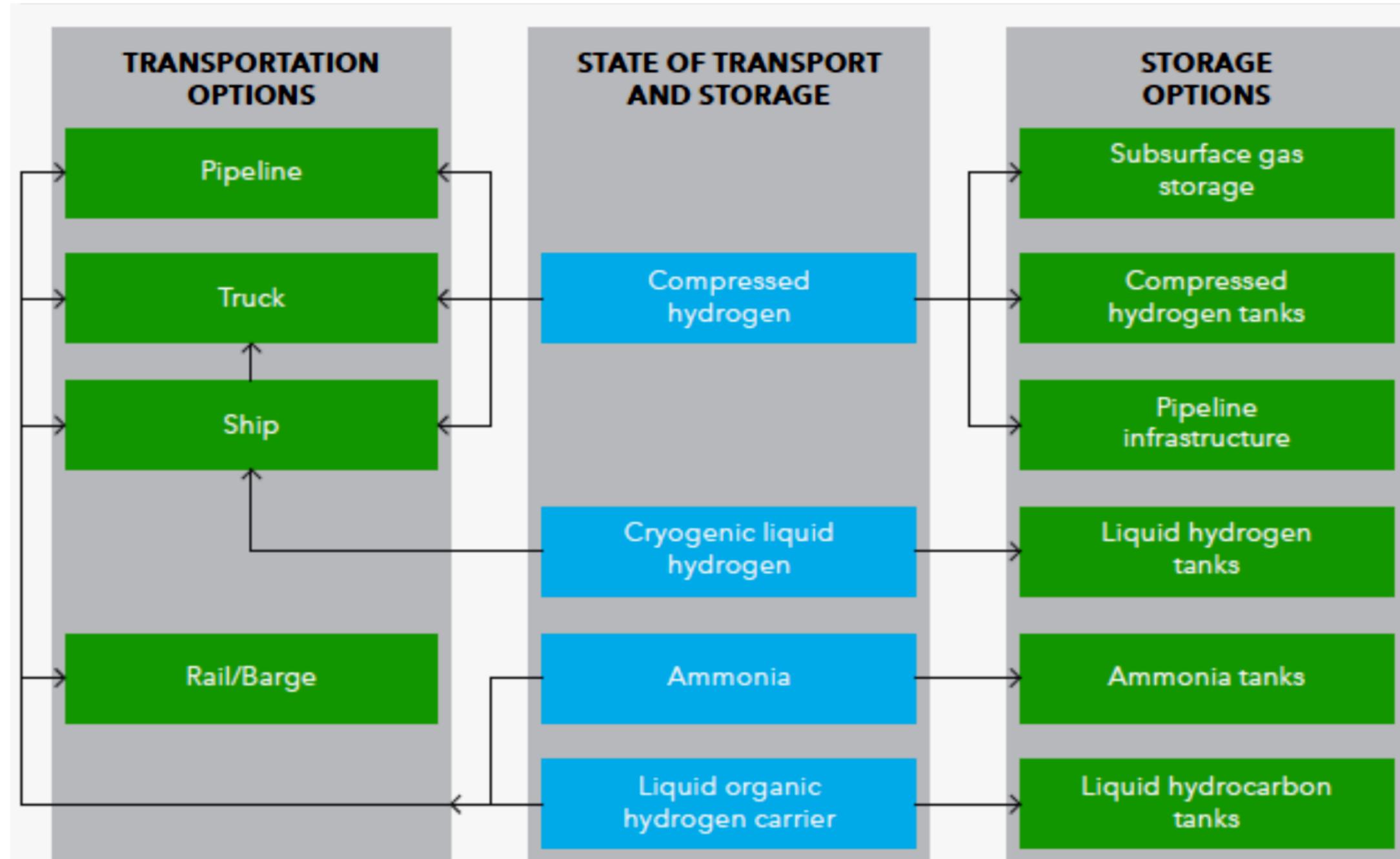


لا دور له في معظم
الاستراتيجيات
وخارطات الطريق



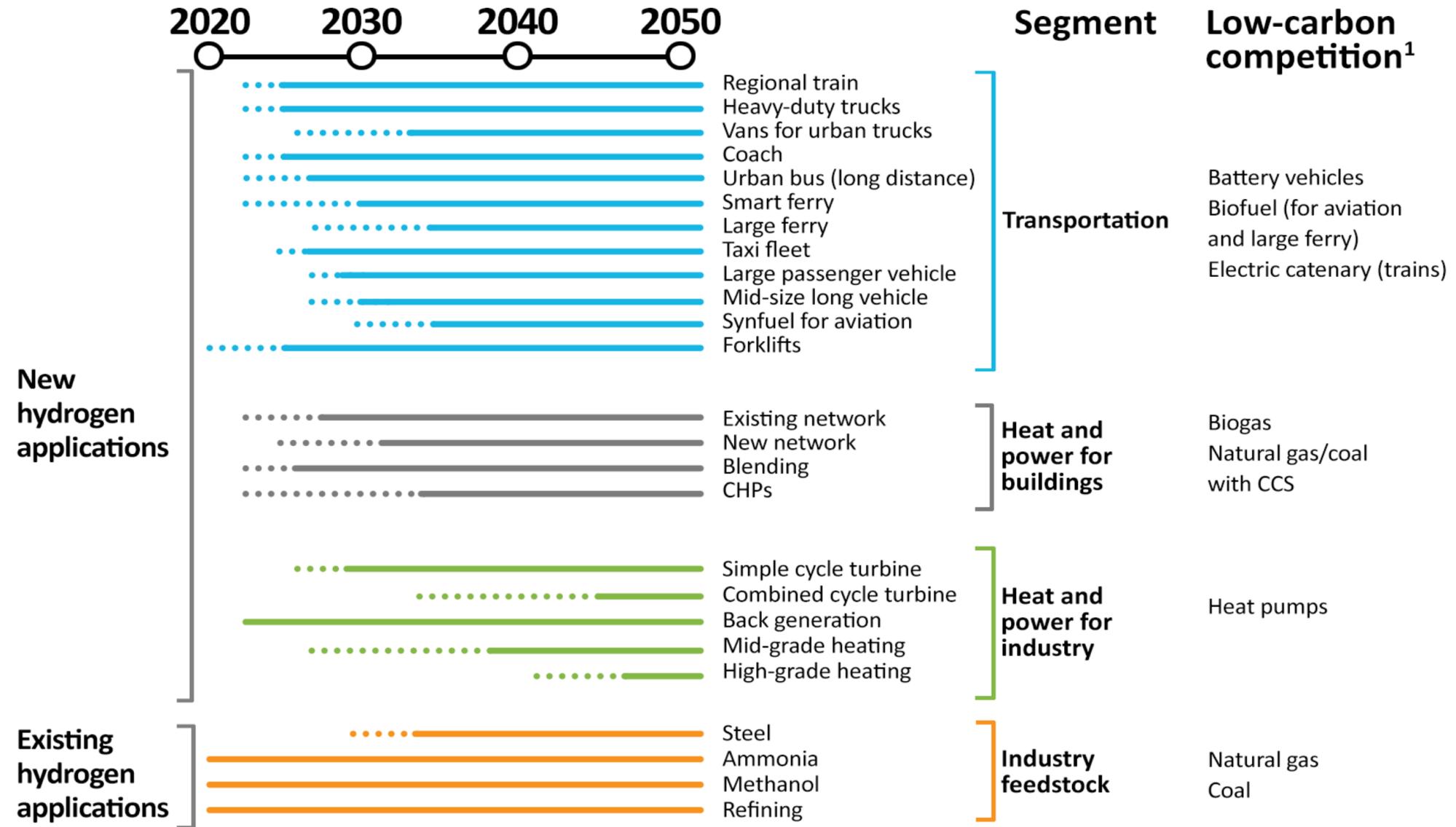
Adapted from: Ames et al., 2018

الخيارات المتاحة لنقل الهيدروجين وتخزينه



Source: Aames et al., 2018

التطبيقات الحالية والمستقبلية للهيدروجين



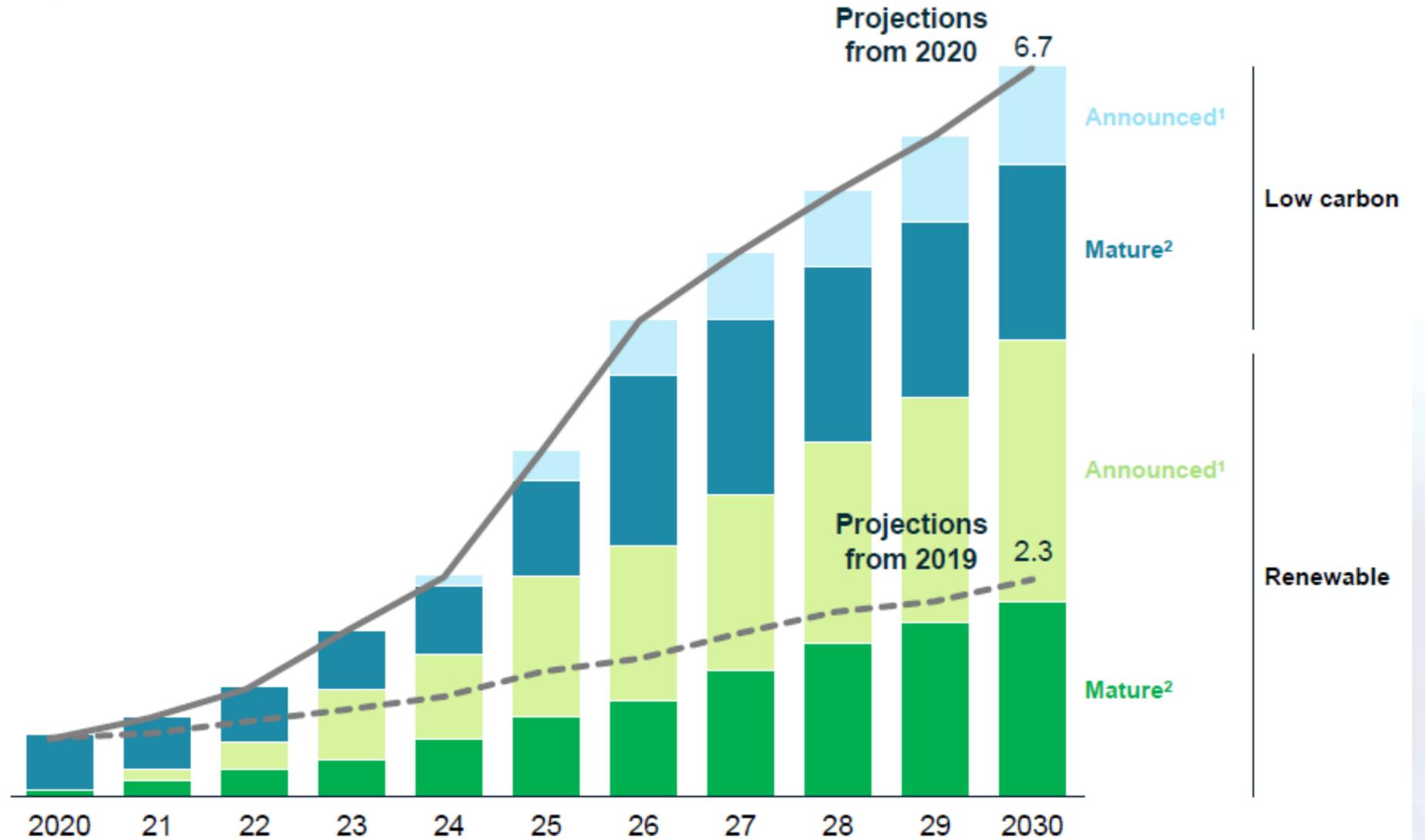
1. In some cases hydrogen may be the only realistic alternative, e.g. for heavy-duty transport and industrial zones without access to CCS

— Hydrogen is competitive in average conditions and region Hydrogen is competitive in optimal conditions and regions

Source: The Hydrogen Council, Path to Hydrogen Competitiveness: A Cost Perspective Report (20 January 2020)

الطاقة الإنتاجية المعتمدة للهيدروجين النظيف حتى عام 2030

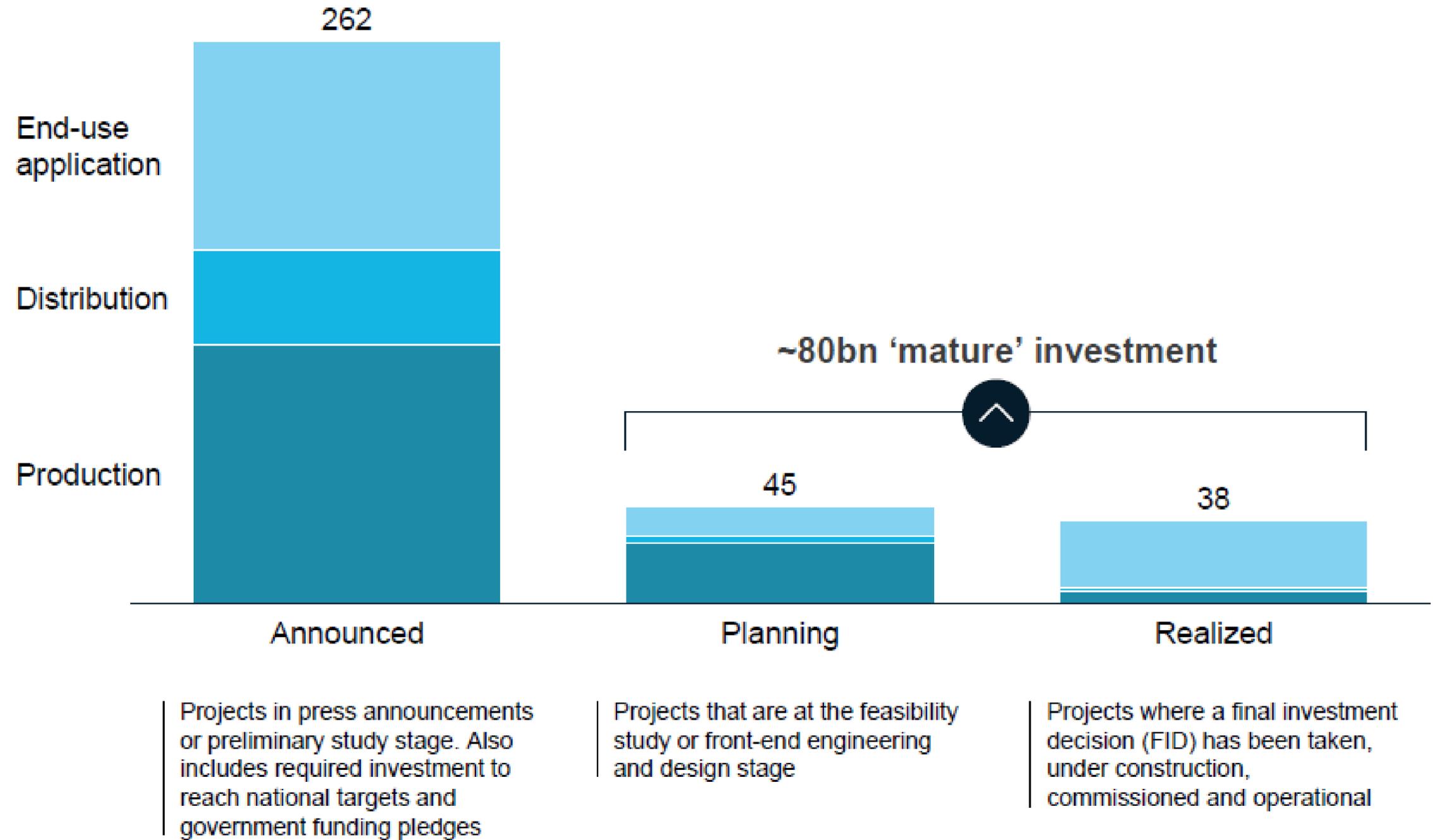
Cumulative production capacity
Mt p.a.



1. Includes projects at preliminary studies or at press announcement stage
 2. Includes projects that are at the feasibility study or front-end engineering and design stage or where a final investment decision (FID) has been taken, under construction, commissioned or operational

Source: Hydrogen Insights, A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness, February 2021; www.hydrogencouncil.com.

الاستثمارات المتوقعة في مجال الهيدروجين حتى عام 2030



Source: Hydrogen Insights, A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness, February 2021; www.hydrogencouncil.com.

أعضاء مجلس الهيدروجين



مجلس الهيدروجين هو مبادرة عالمية يقودها الرؤساء التنفيذيون لشركات رائدة ذات رؤية موحدة وطموحة طويلة الأجل حول الهيدروجين لتعزيز انتقال الطاقة النظيفة من أجل مستقبل أفضل وأكثر مرونة

- يضم المجلس 109 شركات من أكثر من 20 دولة حول العالم تغطي سلسلة القيمة بأكملها
- وتضم العضوية حالياً 4 شركات نفط دولية و 3 شركات نفط وطنية (بما في ذلك أرامكو) وشركة خدمات نفطية واحدة وشركات بتروكيماوية كبرى (مثل سابك).

ملخص للتحول نحو اقتصاد الهيدروجين وتأثيره المحتمل على النفط والغاز

- التحول نحو اقتصاد الهيدروجين على مدى العقود الثلاثة القادمة هو تطور جدي في سوق الطاقة العالمية ويهدف إلى الوصول إلى 10-18% من إجمالي سوق الطاقة بحلول عام 2050. وهو مدعوم بسياسات وخرائط طريق من قبل عدد كبير من البلدان التي تستهلك كميات كبيرة من الطاقة، وكذلك من قبل عدد كبير من الشركات التي تغطي سلسلة القيمة الكاملة للطاقة.
- يستهدف هذا التحول الهيدروجين الأخضر كأولوية، ومن الممكن تحقيق ذلك إذا خضعت تقنيات التحليل الكهربائي لتحسينات كبيرة. ومع ذلك، من المرجح أن يكون للهيدروجين الأزرق نصيب جيد من أسواق الطاقة.
- يعد قطاع النقل أحد التطبيقات الرئيسية المستهدفة، والذي قد يكون له تأثير حاد على أسواق النفط، مع الأخذ في الاعتبار نمو سوق المركبات الكهربائية أيضاً.
- سيستمر نمو الطلب على موارد الطاقة الأحفورية التقليدية، لكنها قد تكون تحت ضغط كبير.

الفرص والتحديات المحتملة لاقتصاد الهيدروجين بالنسبة للدول العربية المنتجة للنفط

- ✓ يوفر الهيدروجين فرص طويلة الأمد لنمو وتنويع الاقتصاد:
- ✓ سيؤدي إنتاج الهيدروجين الأخضر إلى تنويع الاقتصاد للعديد من الدول العربية عن طريق الاستفادة من موارد الطاقة الشمسية المرتفعة في المنطقة
- ✓ قد يؤدي إنتاج الهيدروجين الأزرق باستخدام مواد أولية منخفضة القيمة، كالنفوط الثقيلة أو مخلفات النفط، إلى توفير عوائد اقتصادية مستقبلية أفضل مما قد يوفره استخداماتها التقليدية كما سيؤدي ذلك إلى إطالة أمد استخدام احتياطات النفط والغاز لعقود عديدة
- ✓ يمكن أن يوفر الهيدروجين الأزرق طريقاً لإنتاج ما يكفي من ثاني أكسيد الكربون لاستخدامه في الاستخلاص المعزز للنفط، ومواصلة استغلال الموارد النفطية المتاحة والمتبقية في المكامن
- ✓ يوفر الهيدروجين الأزرق مساراً يمكن الدول العربية من الوفاء بالتزامات اتفاقية باريس للتغير المناخي: سيؤدي اقتران إنتاج الهيدروجين مع الاستخلاص المعزز للنفط في الدول المنتجة للنفط إلى تمكين هذه الدول من الوفاء بالتزامات الحالية أو التي يمكن أن تفرض مستقبلاً والمتعلقة بالحد من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون.
- ✓ التحديات المحتملة:
- ✓ قد يؤدي التحول إلى اقتصاد الهيدروجين على المدى الطويل، خاصة التحول نحو الهيدروجين الأخضر، إلى خفض الطلب على عدد من المنتجات البترولية، مما قد ينعكس سلباً على أسعار النفط
- ✓ قد تنتقل مسؤولية الاحتباس الحراري تدريجياً إلى الدول والشركات المنتجة للوقود الأحفوري، وبالتالي فرض التزامات مالية على هذه الدول والشركات

المسار الموصى به للدول العربية المنتجة للنفط

- تطوير إستراتيجيات وطنية لصناعة الهيدروجين تأخذ بالاعتبار كافة نقاط القوة والمخاطر والنافذة المتاحة لوضع موطئ قدم في اسواق الطاقة النظيفة.
- وضع خارطة طريق تمهد الطريق لتنفيذ إستراتيجيات الهيدروجين الوطنية.
- صياغة أهداف طموحة وقابلة للتنفيذ لإنتاج الهيدروجين الأزرق والاخضر.
- تخصيص الموارد المالية الضرورية لتنفيذ مشاريع نموذجية لإنتاج الهيدروجين الأزرق المنتج من النفط.
- دعم التقنيات الجديدة الواعدة التي من شأنها أن تعزز الوضع التنافسي للهيدروجين الأزرق المنتج من النفط.
- الاسراع في تنفيذ مشاريع فصل وتخزين واستخدام ثاني اكسيد الكربون (CCUS)
- تحديد المشاريع ذات العوائد السريعة وإعداد دراسات جدوى اقتصادية لها.
- تطوير القوى العاملة لدعم الأنشطة المتعلقة بالهيدروجين.
- تفعيل التعاون ما بين الدول العربية المنتجة للنفط والغاز لتحديد و تطوير المشاريع ذات الاهتمام المشترك و تسريع تنفيذ استراتيجيات الهيدروجين الوطنية.
- العمل على توثيق العلاقات مع الجهات الصناعية السباقة في مجال إنتاج واستخدام الهيدروجين الأزرق و الاخضر.

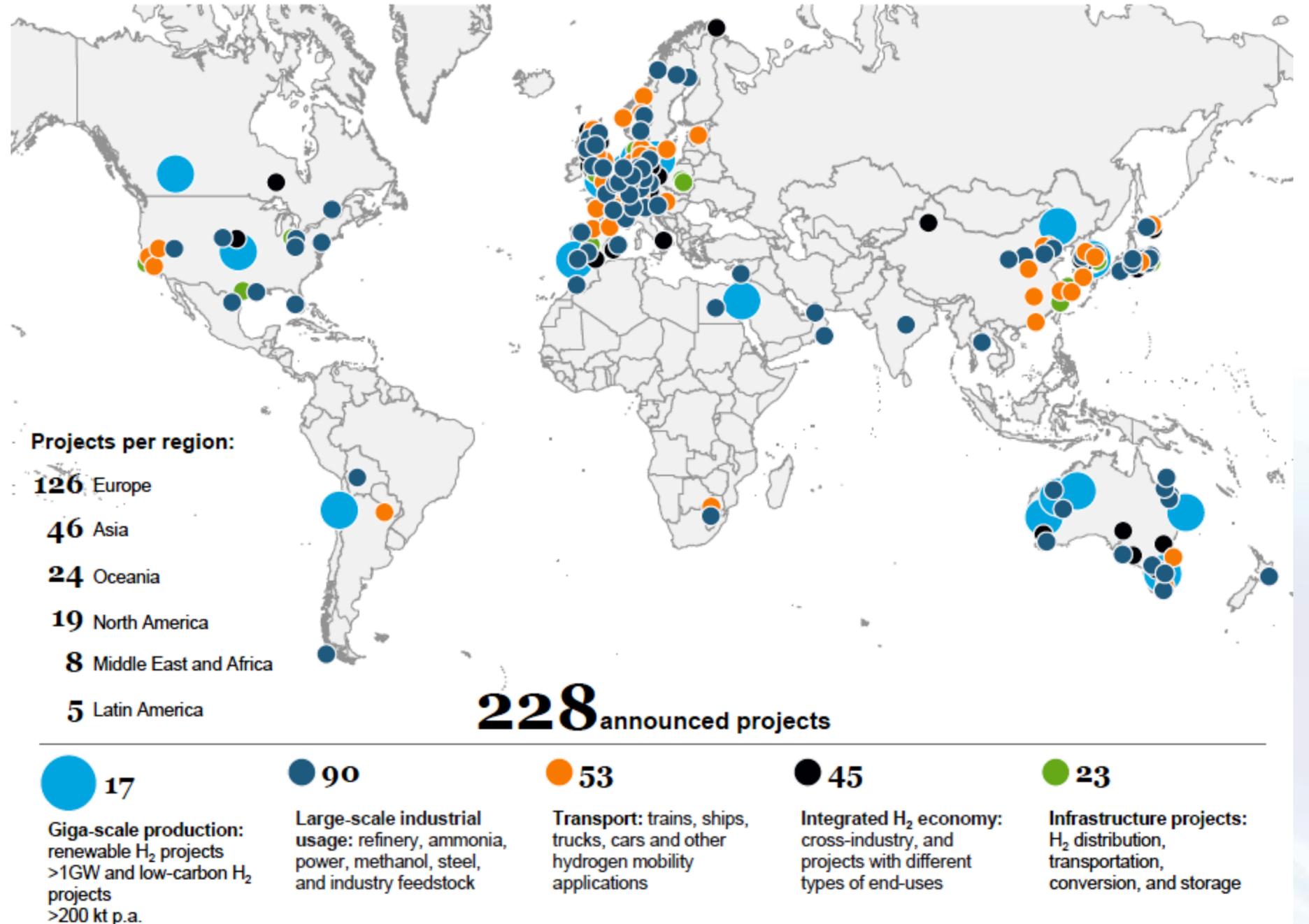
- تم إعداد هذا العرض بناءً على ورقة عمل أعدها فريق عمل بإشراف مؤسسة الكويت للتقدم العلمي، والورقة بعنوان: "نحو استراتيجية الكويت الوطنية لاقتصاد الهيدروجين" - 2021
- يتقدم معدوا العرض بالشكر لأعضاء فريق العمل، والذي يضم:

د. محمد الرمضان، مدير الأبحاث، مؤسسة الكويت للتقدم العلمي	د. سالم الحجرف، نائب المدير العام، مؤسسة الكويت للتقدم العلمي
د. مأمون عبيد حنبل، مستشار، معهد الكويت للأبحاث العلمية	المهندس وائل المزيدي، الكاتب الرئيسي للورقة البيضاء (Avance Labs)
د. عصام السيد عمر، مؤسسة الكويت للتقدم العلمي	د. فيصل الحميدان، باحث، معهد الكويت للأبحاث العلمية
المهندس فوزي حمادة، شركة نفط الكويت	المهندسة دلال السري، مؤسسة البترول الكويتية
المهندس أحمد المزيدي، شركة البترول الوطنية الكويتية	المهندس علي الهرز، شركة نفط الكويت
	المهندس أحمد البغلي، شركة البترول الوطنية الكويتية

شكراً على حسن استماعكم

- الهدف من هذا العمل هو استكشاف التأثير والفرص المحتملة التي قد يكون لتحول الهيدروجين في سوق الطاقة
- تمتلك الدول العربية المنتجة للنفط والغاز الموارد اللازمة لإنتاج الهيدروجين الأزرق والأخضر. ومن الممكن الاستفادة من إنتاج الهيدروجين الأزرق للحصول على كميات اقتصادية من ثاني أكسيد الكربون من أجل تعزيز استخلاص النفط، كما يوفر الهيدروجين الأخضر فرصة لتنويع الاقتصادات الوطنية، بالإضافة إلى كونه مصدر طاقة صديق للبيئة
- إن المشاركة في التوجه العالمي نحو اقتصاد الهيدروجين ستدعم دول المنطقة للوفاء بالتزاماتها بموجب اتفاقية باريس المرتبطة بالاحترار العالمي.
- نجحت صناعة النفط والغاز في دول مجلس التعاون الخليجي والدول العربية الأخرى في مواجهة التحديات التي واجهتها سوق الطاقة على مدار الخمسين عاماً الماضية، ولديها خبرة واسعة في إنتاج الهيدروجين الرمادي، ويمكن للدول العربية توظيف خبراتها لإنتاج الهيدروجين الأزرق.
- يتوجب على دول النفط والغاز العربية وضع استراتيجيات للاستفادة من الفرص التي يتيحها اقتصاد الهيدروجين لتنويع الاقتصادات الوطنية والحد من التأثير السلبي المحتمل على البيئة وعلى موارد النفط والغاز.

توزع مشاريع الهيدروجين المتعلقة بمختلف حلقات سلسلة القيمة في العالم



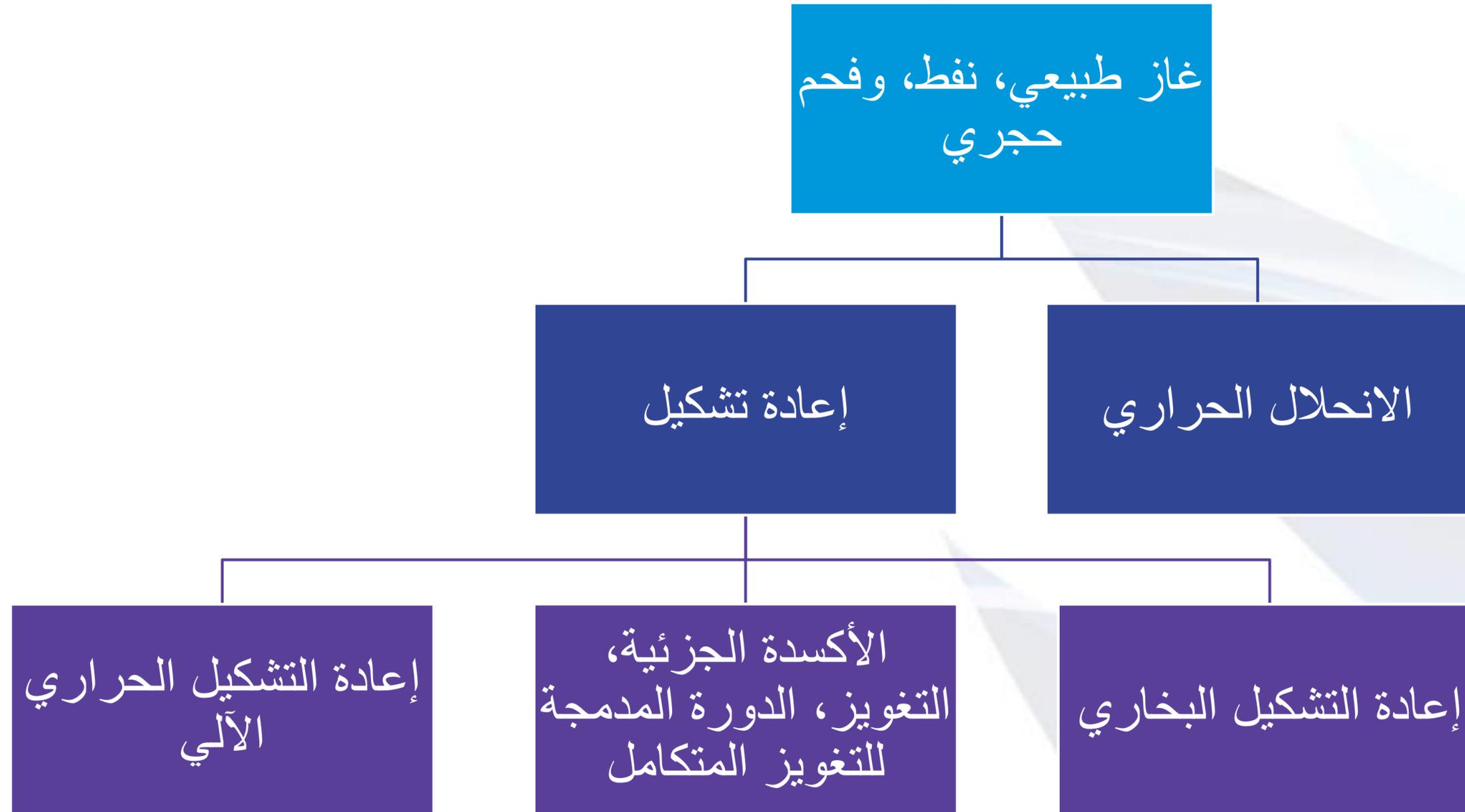
Source: Hydrogen Insights, A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness, February 2021; www.hydrogencouncil.com.

- الحالة الراهنة للتحول نحو اقتصاد الهيدروجين في العالم
- تكنولوجيات إنتاج الهيدروجين
- اقتصاديات الهيدروجين الأزرق والأخضر
- التوصيات المتعلقة بدور الدول العربية المنتجة للنفط والغاز في هذا التحول

طرق إنتاج الهيدروجين

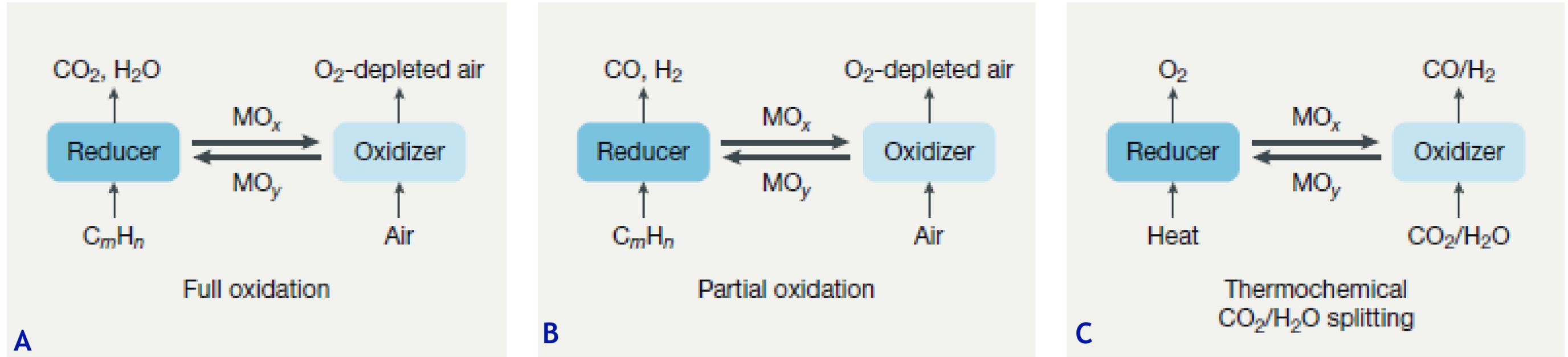
تتوفر مجموعة كبيرة ومتنوعة من المواد الأولية والتقنيات والعمليات الصناعية لإنتاج الهيدروجين. ويهيمن إنتاج الهيدروجين الرمادي حالياً على السوق. ومع ذلك، يتم حالياً تكثيف جهود البحث والتطوير لتحسين اقتصاديات الهيدروجين الأخضر

إنتاج الهيدروجين الرمادي من الوقود الأحفوري



Source: J.D. Holladay *, J. Hu, D.L. King, Y. Wang. 2009. An overview of hydrogen production technologies, Catalysis Today 139, 244-260; P. Nikolaidis and A. Poullikkas. 2017. A comparative overview of hydrogen production processes, Renewable and Sustainable Energy Reviews 67, 597-611

التكرار الكيميائي المدمج مع إعادة التشكيل: تكنولوجيات قيد التطوير



تطورات تكنولوجية جديدة تهدف إلى تحسين العمليات:

- أكسدة هوائية كاملة أو احتراق مواد هيدروكربونية C_mH_n (A)
- أكسدة جزئية لمركبات هيدروكربونية C_mH_n أو تغويز الكربون لإنتاج غاز التخليق (B)
- الانقسام الحراري الكيميائي لثاني أكسيد الكربون والماء (C)

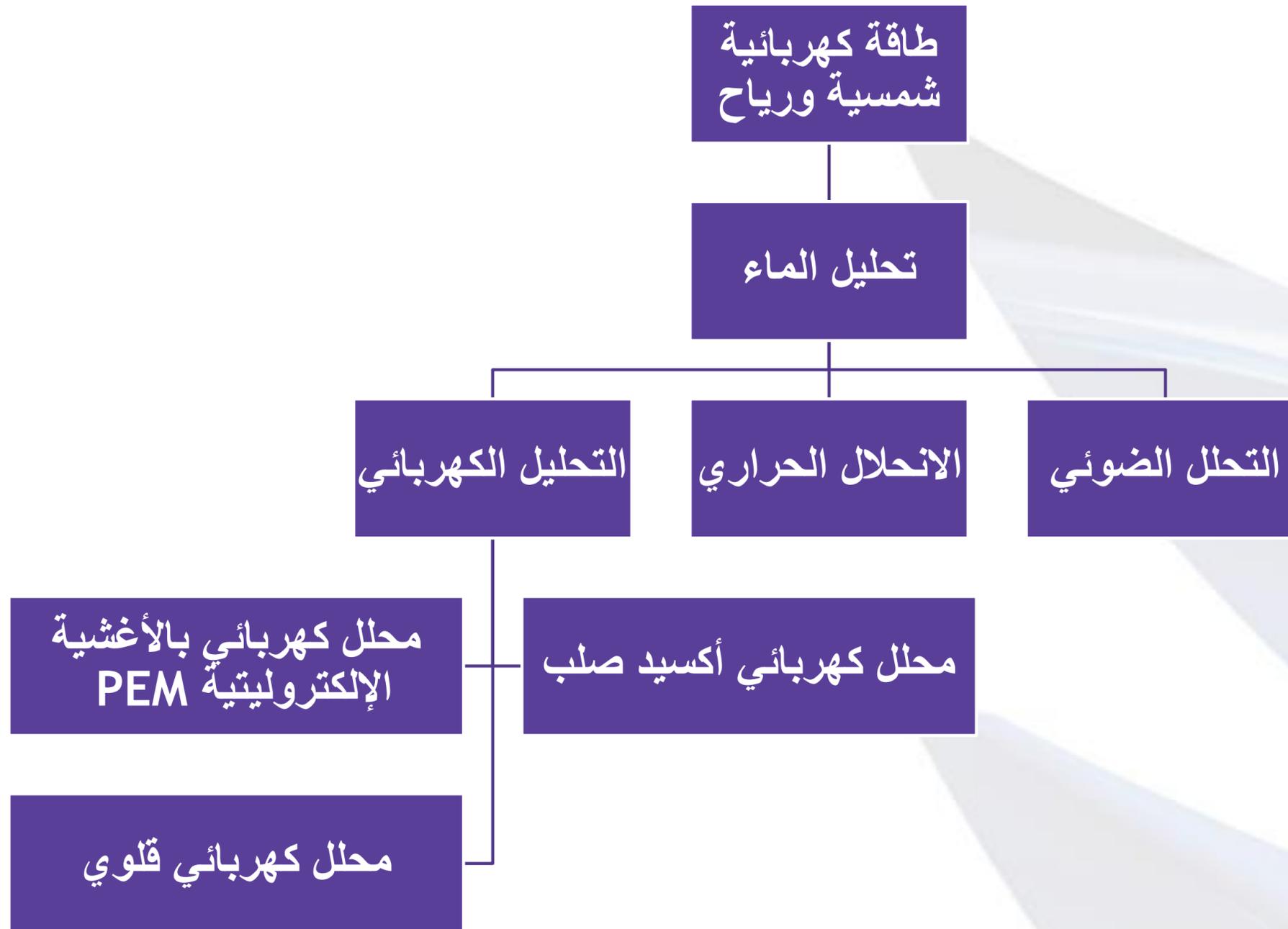
التكرار الكيميائي المدمج مع إعادة التشكيل: آخر المستجدات

- تطوير عملية تكرار كيميائي مدمج لمعالجة مخلفات النفط الثقيلة مع احتجاز ثاني أكسيد الكربون (جهد بحثي تعاوني بين أرامكو السعودية وجامعة تشالمرز للتكنولوجيا في السويد). تم التثبيت من التكنولوجيا باستخدام الكيروسين مما أدى إلى تحويل الكيروسين بالكامل إلى H_2 و CO
- تتميز عملية التكرار الكيميائي المدمج مع إعادة التشكيل بمزايا اقتصادية على المدين المتوسط والطويل وفي ظل وجود إنتاج مشترك للهيدروجين والكهرباء من أجل تقليل تكلفة ثاني أكسيد الكربون إلى أقل من 85 يورو / طن

تحويل الهيدروجين الرمادي إلى هيدروجين أزرق

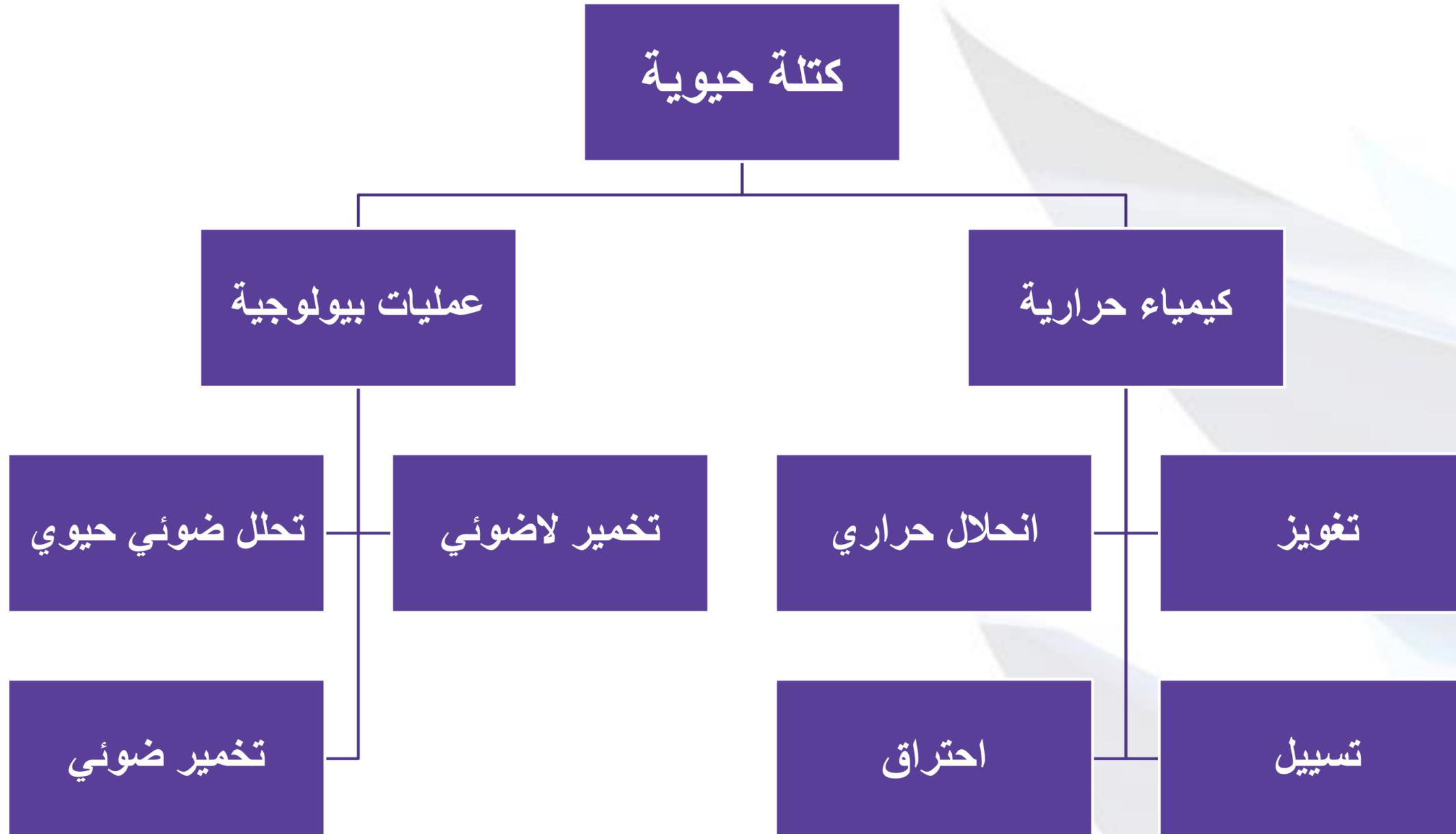
- يرتبط إنتاج الهيدروجين من الوقود الأحفوري دوماً بإنتاج ثاني أكسيد الكربون كمنتج ثانوي
- تعتمد البصمة الكربونية لإنتاج الهيدروجين من الوقود الأحفوري بشكل أساسي على المواد الأولية والتكنولوجيا المستخدمة في عملية الإنتاج
- يتطلب الإنتاج المستدام للهيدروجين من الوقود الأحفوري حصر الانبعاثات؛ لذا، يتوجب جمع ثاني أكسيد الكربون وتخزينه في عملية تسمى إزالة الكربون والتي يمكن تنفيذها قبل أو بعد الاحتراق
- أحد خيارات التخزين الهامة للدول المنتجة للنفط هو استخدام ثاني أكسيد الكربون في عمليات إنتاج النفط المعزز والذي ينطوي على حقن الغاز في أعماق المكامن النفطية، مما يؤدي إلى رفع المردود الاقتصادي لعملية جمع ثاني أكسيد الكربون

إنتاج الهيدروجين من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح



Source: J.D. Holladay *, J. Hu, D.L. King, Y. Wang. 2009. An overview of hydrogen production technologies, Catalysis Today 139, 244-260; P. Nikolaidis and A. Poullikkas. 2017. A comparative overview of hydrogen production processes, Renewable and Sustainable Energy Reviews 67, 597-611

إنتاج الهيدروجين من الكتلة الحيوية



Source: J.D. Holladay *, J. Hu, D.L. King, Y. Wang. 2009. An overview of hydrogen production technologies, Catalysis Today 139, 244-260; P. Nikolaidis and A. Poullikkas. 2017. A comparative overview of hydrogen production processes, Renewable and Sustainable Energy Reviews 67, 597-611

إنتاج الهيدروجين من الوقود الأحفوري : النضج التكنولوجي والمزايا والعيوب

التكنولوجيا	الكفاءة (%)	المزايا / العيوب الرئيسية
إعادة التشكيل البخاري	74-85	التقنية الأكثر تقدماً وتطبيقاً، توفر بنية تحتية واسعة الانتشار / ثاني أكسيد الكربون منتج ثانوي، تعتمد على الوقود الأحفوري
الأكسدة الجزئية، التغويز، الدورة المدمجة للتغويز المتكامل	60-75	تقنية مثبتة ومطبقة تجارياً، توفر بنية تحتية واسعة الانتشار / ثاني أكسيد الكربون منتج ثانوي، تعتمد على الوقود الأحفوري
إعادة التشكيل الحراري الآلي	60-75	تقنية مثبتة ومطبقة تجارياً، توفر بنية تحتية واسعة الانتشار / ثاني أكسيد الكربون منتج ثانوي، تعتمد على الوقود الأحفوري
الانحلال الحراري للهيدروكربونات	--	تقنية خالية من الانبعاثات / الكربون منتج ثانوي، تعتمد على الوقود الأحفوري

Source: J.D. Holladay *, J. Hu, D.L. King, Y. Wang. 2009. An overview of hydrogen production technologies, Catalysis Today 139, 244-260; P. Nikolaidis and A. Poullikkas. 2017. A comparative overview of hydrogen production processes, Renewable and Sustainable Energy Reviews 67, 597-611

إنتاج الهيدروجين بواسطة الطاقة المتجددة: النضج التكنولوجي والمزايا والعيوب

التكنولوجيا	الكفاءة (%)	المزايا / العيوب الرئيسية
التحليل الكهربائي (كافة التقنيات)	40-70	تقنية عديمة التلوث عند استخدام كهرباء من مصادر طاقة متجددة، تكنولوجيا مثبتة، بنية تحتية متوفرة، مواد أولية وفيرة، الأكسجين هو المنتج الثانوي الوحيد، تساهم في تكامل أنظمة الطاقة المتجددة كخيار لتخزين الكهرباء/ كفاءة عامة منخفضة، تكاليف رأسمالية عالية
انحلال حراري بالطاقة المتجددة	20-45	تقنية قيد التطوير تعتمد مواد أولية نظيفة ومستدامة ووفيرة، الأكسجين هو المنتج الثانوي الوحيد/ سمية بعض العناصر المستخدمة، مشاكل التآكل، تكاليف رأسمالية عالية
التحلل الضوئي	0.06	تقنية قيد التطوير خالية من الانبعاثات وتعتمد مواد أولية نظيفة ومستدامة ووفيرة، الأكسجين هو المنتج الثانوي الوحيد/ تتطلب ضوء الشمس، كفاءة تحويل منخفضة، ومواد تحفيز ضوئي محدودة الفعالية

Source: J.D. Holladay *, J. Hu, D.L. King, Y. Wang. 2009. An overview of hydrogen production technologies, Catalysis Today 139, 244-260; P. Nikolaidis and A. Poullikkas. 2017. A comparative overview of hydrogen production processes, Renewable and Sustainable Energy Reviews 67, 597-611

إنتاج الهيدروجين من الكتلة الحيوية: النضج التكنولوجي والمزايا والعيوب

التكنولوجيا	الكفاءة (%)	المزايا / العيوب الرئيسية
انحلال حراري وتغويز	35-50	تقنية حيادية بالنسبة لانبعاث ثاني أكسيد الكربون، مواد أولية وفيرة ورخيصة/ قطران منتج فرعي، تنوع محتوى الهيدروجين بسبب موسمية المواد الأولية ووجود شوائب
تحلل ضوئي حيوي	10	تقنية تستهلك ثاني أكسيد الكربون، الأكسجين المنتج الثانوي الوحيد، تعمل في ظل ظروف معتدلة/ تتطلب ضوء الشمس، كفاءة الإنتاج منخفضة، تتطلب حجم مفاعل كبير، حساسية عالية نحو الأكسجين، وكلفة عالية للمواد الخام
تخمير لاضوئي	60-80	تقنية حيادية بالنسبة لانبعاث ثاني أكسيد الكربون، يمكن الإنتاج بدون ضوء، تساهم في إعادة تدوير النفايات، لا تتأثر بوجود الأكسجين/ إزالة الأحماض الدهنية، كفاءة الإنتاج منخفضة، كفاءة تحويل منخفضة، تتطلب حجم مفاعل كبير
تخمير ضوئي	0.1	تقنية حيادية بالنسبة لانبعاث ثاني أكسيد الكربون، تساهم في إعادة تدوير النفايات، يمكن استخدام نفايات عضوية مختلفة ومياه الصرف الصحي/ تتطلب ضوء الشمس، كفاءة الإنتاج منخفضة، كفاءة تحويل منخفضة جداً، تتطلب حجم كبير للمفاعل، حساسية عالية نحو الأكسجين

Source: J.D. Holladay *, J. Hu, D.L. King, Y. Wang. 2009. An overview of hydrogen production technologies, Catalysis Today 139, 244-260; P. Nikolaidis and A. Poullikkas. 2017. A comparative overview of hydrogen production processes, Renewable and Sustainable Energy Reviews 67, 597-611

Pathway	Technology	TRL	Feedstocks	Scalability	Efficiency	LCOH
Thermochemical	Steam Methane Reforming (SMR)	TRL9	Natural gas	200-500 ton/day	83% (3 H ₂ for each CH ₄ molecule)	\$0.9-1.8/kg
	Autothermal Reforming (ATR)	TRL9	Natural gas	500-1,000 ton/day	90% (3½ H ₂ for each CH ₄)	n.a.
	Partial Oxidation (PO _x)	TRL9	Refinery fuel gas, naphtha cracker gas, LPG, fuel oil, heavy oil	500-1,000 ton/day	70-80% (3 H ₂ for each CH ₄ molecule)	n.a.
	Gasification	TRL9	Coal	500-800 ton/day	n.a.	\$1.6-2.2/kg
	Pyrolysis	Oil/Coal TRL 9 Gas TRL 4-5	Natural gas, oil, coal	50 ton/day	NA	\$2.2-3.4/kg
Electrolysis	Alkaline (AE)	TRL9	Water +Electricity	<70 ton/day	63-71% (Stack) / 51%-60% (System)	\$2.6-6.9/kg
	Proton-exchange Membrane (PEM)	TRL9	Water + Electricity	<300 ton/day	60-68% (Stack) / 46-60% (System)	\$3.5-7.5/kg
	Solid Oxide Electrolyzer Cell (SOEC)	TRL 6-7	Water + Electricity	NA	100% (Stack) / 76-81% (System)	\$5.0-8.5/kg

Mature Technology for Blue Hydrogen Already Used in Kuwait and Other Arab Countries

Mature Technologies for Blue Hydrogen Using Oil with Potential Application in Oil Producing Countries Requiring Economic Data

Mature Technologies for Green Hydrogen Requiring R&D to Reduce Cost

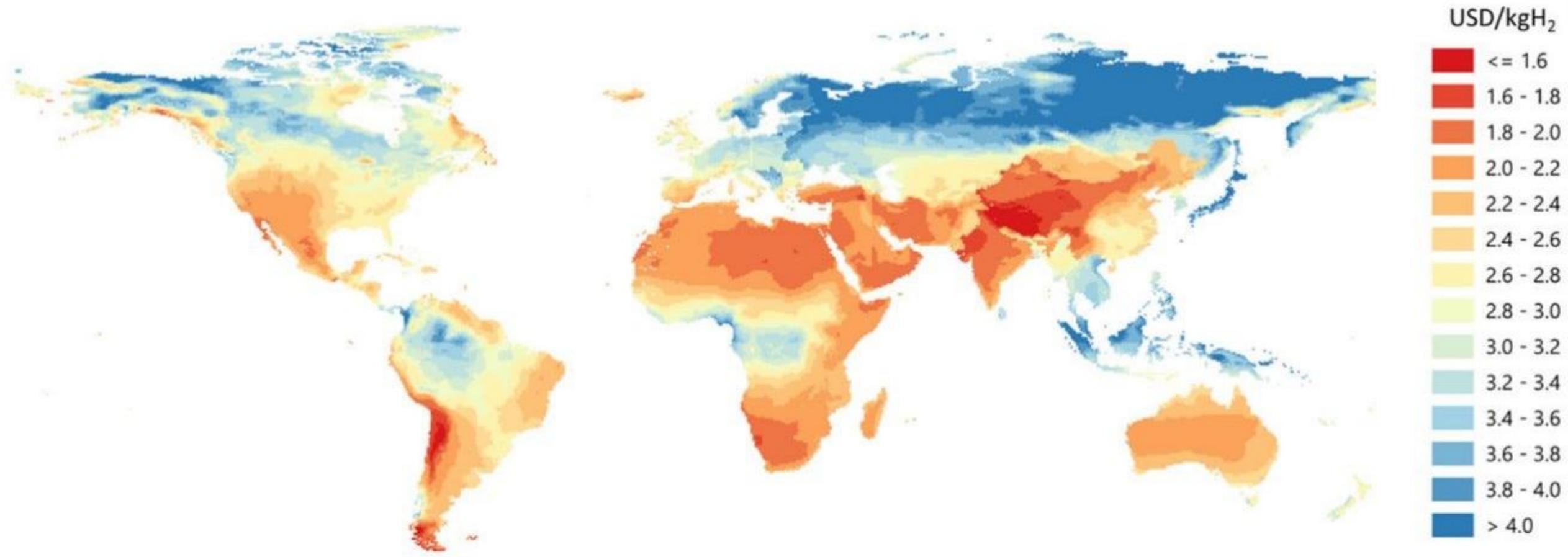
7/27/2021

Source: Kuwait Hydrogen Blue Paper, Berenschot Consultancy, Kearney Energy Transition Institute (Hydrogen Fact Book), ETN Global (Path Towards Zero-Carbon Gas Turbines), and Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO)

نقل الهيدروجين: الخيارات والتكاليف

	Gaseous State			Liquid State			Solid State
Options	Salt Caverns	Depleted gas fields	Pressurized Containers	Liquid H ₂	NH ₃	LOHC	Metal Hydrides
Usage Volume & cycling)	Large, months-weeks	Large, seasonal	Small, daily	Medium, days-weeks	Large, months-weeks	Large, months-weeks	Small, days-weeks
LCOE (\$/kg)	\$0.23	\$1.90	\$0.19	\$4.57	\$2.83	\$4.50	n.a.
Projected LCOS (\$/kg)	\$0.11	\$1.07	\$0.17	\$0.95	\$0.87	\$1.86	n.a.
Geographic Availability	Limited	Limited	Unlimited	Unlimited	Unlimited	Unlimited	Unlimited

التكاليف المتوقعة لإنتاج الهيدروجين الأخضر من الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح في مواقع على اليابسة



المنطقة العربية من بين أفضل المناطق المرشحة لإنتاج الهيدروجين الأخضر: موارد وفيرة وقربها من الأسواق الرئيسية

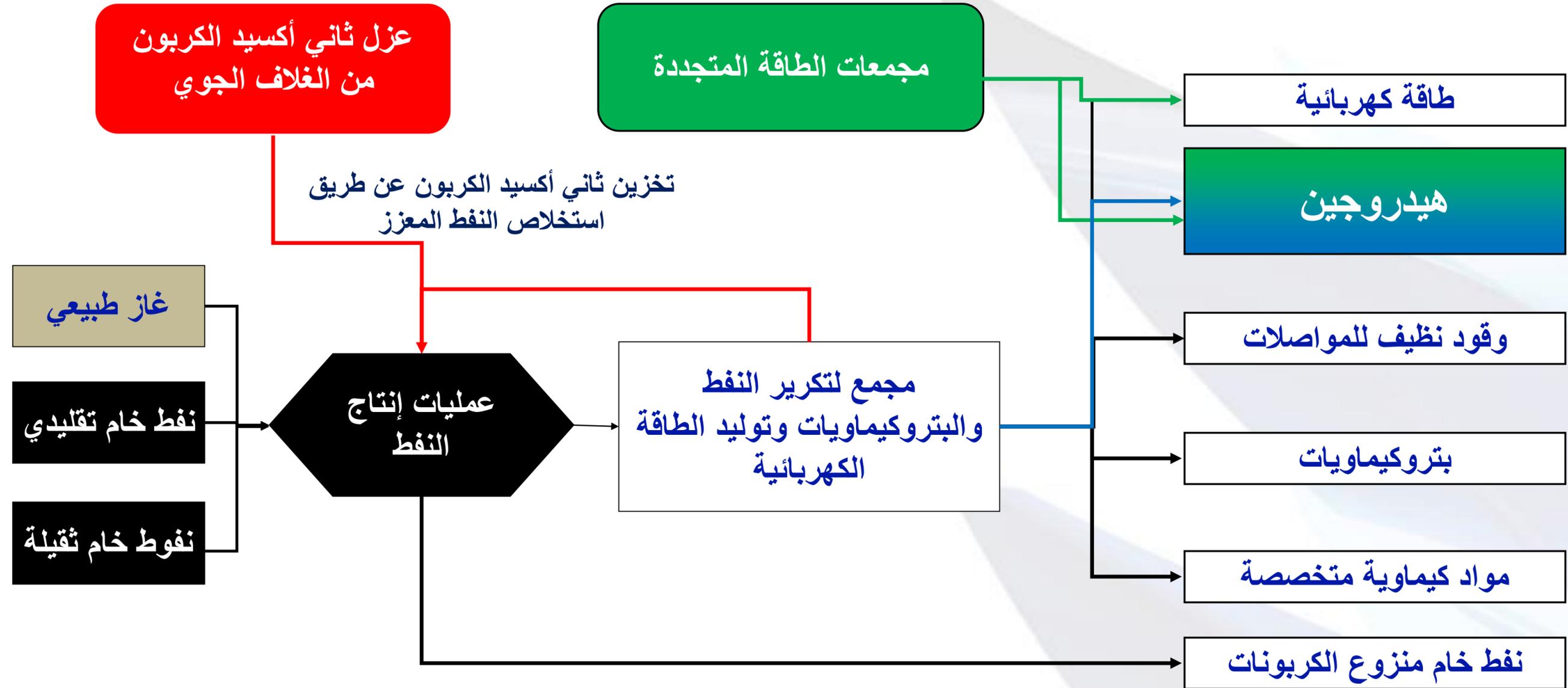
الوضع التنافسي للدول العربية لإنتاج الهيدروجين

الهيدروجين الأخضر	الهيدروجين الأزرق
✓ موارد طاقة شمسية وفيرة	✓ توفر المواد الأولية الهيدروكربونية السائلة، بما في ذلك النفط الخام الثقيلة ومخلفات النفط والغاز الطبيعي
✓ القدرة على توليد الكهرباء المتجددة بتكلفة منخفضة للغاية (~ 1.35 سنت للكيلووات تم تحقيقها بالفعل في الإمارات العربية المتحدة)	✓ توفر كفاءات قوية في إنتاج الهيدروجين والأمنيا
✓ توفر إطار تنظيمي لمنتجي الطاقة من القطاع الخاص	✓ وجود مؤسسات البحث والتطوير القادرة على نقل التكنولوجيا والمزيد من التطوير
✓ خبرة في التحضير لتقنيات مختلفة لتوليد الكهرباء من الطاقة الشمسية	✓ التزام قوي تجاه مشاريع الاستخلاص المعزز للنفط باستخدام تقنيات احتجاز ثاني أكسيد الكربون ونقله وتخزينه واستخدامه
✓ توفر محطات طاقة شمسية موصولة بالشبكة الكهربائية وممتاحة لإنتاج الهيدروجين فوراً	✓ توفر دراسات جدوى بشأن احتجاز ثاني أكسيد الكربون ونقله وتخزينه واستخدامه في الاستخلاص المعزز للنفط

المسار الموصى به للدول العربية المنتجة للنفط

- العمل على تطوير إستراتيجيات تتعلق بالهيدروجين تشمل ما يلي:
- تحديد وتطوير خيارات إنتاج الهيدروجين الأزرق باستخدام المنتجات الهيدروكربونية التي قد يتأثر الطلب عليها نتيجة التحول نحو اقتصاد الهيدروجين، مع مراعاة الفرص المتاحة لتلبية الاحتياجات لثاني أكسيد الكربون في تطبيقات الاستخلاص المعزز للنفط
- متابعة التطورات التكنولوجية المتعلقة بإنتاج الهيدروجين الأخضر باستخدام موارد الطاقة المتجددة المتاحة والعمل على تحديد طرق تحسين استخدام المرافق المشتركة للهيدروجين الأزرق والأخضر، كمرافق التخزين والنقل والتصدير
- تقييم الخيارات المتاحة لتخزين وشحن الهيدروجين
- تحديد القوى العاملة الماهرة المطلوبة لدعم الأنشطة المتعلقة بالهيدروجين والعمل على تطويرها لضمان الجهوزية
- تحديد احتياجات الصناعات المحلية من أنشطة البحث والتطوير لدعم التوجهات المستقبلية في مجال الهيدروجين
- تحديد الاستخدامات المحتملة للهيدروجين لتلبية الطلب المحلي على الطاقة تماشياً مع التزامات اتفاقية باريس بشأن تغير المناخ
- تطوير خيارات متنوعة للنهج الذي سيتبع في تنفيذ المشاريع المرتبطة بالهيدروجين وإدارتها مع الأخذ في الاعتبار السياسات الوطنية وفرص الشراكات الدولية المتاحة وتعزيز دور القطاع الخاص

- يبدو أن الاستشراف المستقبلي لاقتصاد الهيدروجين متأثر بالنجاح الذي تم تحقيقه في تطور استغلال الطاقة المتجددة والنفط الصخري خلال العقود الماضية. ومن ثمة، يمكن الافتراض أن اقتصاد الهيدروجين سيحقق على الأقل نسبة جيدة من هدفه.
- لا يزال التحول إلى اقتصاد الهيدروجين في مراحله الأولى في مسار سيستمر على مدى السنوات الثلاثين القادمة حتى عام 2050. وسيستفيد هذا التحول من ثروة تكنولوجية ضخمة تم تطويرها على مدى عقود عديدة ماضية. ومع ذلك، يتوجب التنويه إلا أن هذا التحول أكثر تعقيداً من التحولات السابقة في مجال الطاقة نظراً لأن التطوير يتطلب معالجة متكاملة لكافة أجزاء سلسلة القيمة للهيدروجين.
- يتشابه تحدي التحول نحو اقتصاد الهيدروجين مع تحديات أخرى واجهتها صناعات النفط والغاز العربية والعالمية على مدى الخمسين عاماً الماضية، كتحدي التغيرات التي طرأت في الطلب على المنتجات البترولية في السبعينيات والثمانينيات، والزام الصناعة النفطية بتوفير منتجات بترولية منخفضة الكبريت خلال العقد الماضي. وبالتالي، فإن صناعة النفط والغاز العربية لديها من الخبرة ما يمكنها من الاستجابة بفعالية للتحدي الجديد.
- يجب اعتماد نهج منظم وحكيم يشمل مراقبة التطورات المتعلقة باقتصاد الهيدروجين عن كثب، وتحديد الفرص المناسبة للاستفادة من المستجدات خلال السنوات القليلة القادمة.



-
- تم إعداد هذا العرض بناءً على ورقة بيضاء أعدها فريق عمل بإشراف مؤسسة الكويت للتقدم العلمي
 - يتقدم معدوا العرض بالشكر لأعضاء فريق العمل، والذي يضم:

Dr. Salem Alhajraf, Deputy Director-General (KFAS), Dr. Mohammad A. Al-Ramadhan (KFAS) and head of the Task Force

Mr. Wael Al-Mazeedi - lead author (Avance Labs)

Dr. Mamun Halabi, Consultant (KISR)

Dr. Faisal Al-Humaidan (KISR)

Dr. Essam Omar (KFAS)

Ms. Dalal Al-Sirri (KPC)

Mr. Fawzi Hamadah (KOC)

Mr. Ali Al-Herz, (KOC)

Mr. Ahmad Al-Mazeedi (KNPC)

Mr. Ahmad Al-Baghli (KNPC)

Overview of Hydrogen Production Routes

Hydrogen containing compounds are forced to react and rearrange the chemical bonds to produce hydrogen and a side product, or forced to breakdown into their elemental components

(Reforming)



(Water gas shift)



(Partial oxidation)



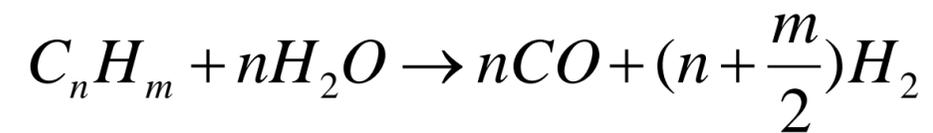
(Cracking)



(Water splitting)



Steam reforming of hydrocarbons is a catalytic process in which the hydrocarbon-stream mixture is converted to hydrogen and carbon oxides:



Feedstocks include: methane and light hydrocarbon feedstock that vaporizes completely such as naphtha

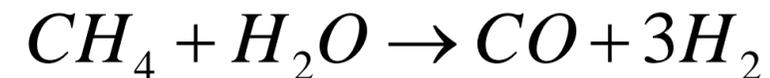
Typical operating temperature for steam reforming is between 700-800°C, and the pressure varies between 3-25 bar.

Currently, it is the main route for hydrogen production

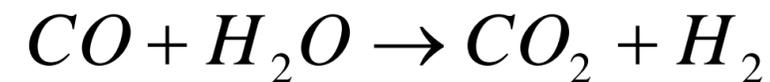
Stages of the Steam Reforming Process

The reforming process consists of 4 stages: 

Reforming: An exothermic reaction produces synthesis gas (CO and H₂) 

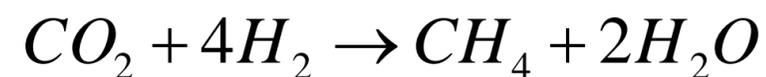
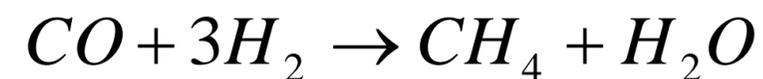


Water-gas shift: 



Gas Purification: CO₂ absorption in amine unit 

Methanation: This exothermic reaction removes residual CO and CO₂ 



Auto-thermal Reforming

Auto-thermal reforming utilizes oxygen and carbon dioxide to form the syngas from methane or other light hydrocarbon feedstock in a single chamber:



The outlet temperature and pressure of the syngas are 950-1100°C and 100 bar.

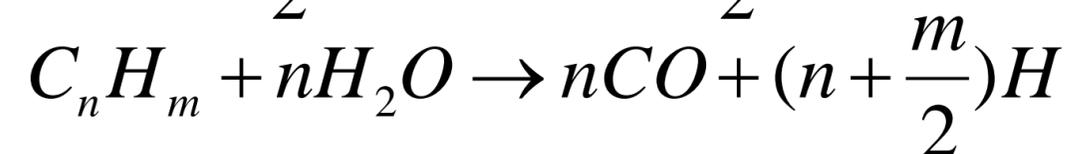
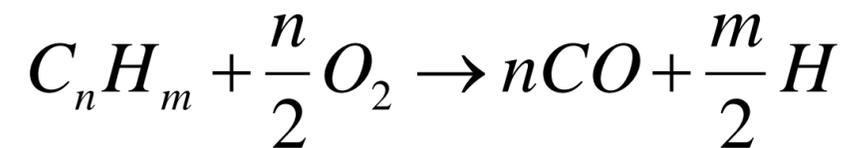
The main advantage is the H₂/CO ratio in the syngas can be varied (i.e., the usage of CO₂ in the reforming reaction result in H₂/CO ratio of 1/1; whereas the usage H₂O produces a syngas with H₂/CO ratio of 2.5/1)

Partial Oxidation (POX) of Hydrocarbons

Feedstock is heavy hydrocarbon fuels and coal ✓

Syngas is generated by partially oxidizing the hydrocarbon feedstock with pure oxygen, then, the carbon monoxide is shifted by steam to produce carbon dioxide and more hydrogen. ✓

The reactions are as follows: ✓



Where $n=1$ and $m=1.3$ for residual fuel oil, and $n=1$ and $m=0.8$ for coal

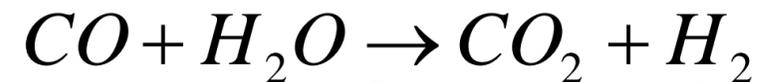
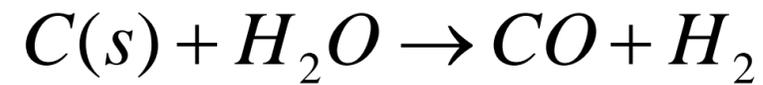
Partial Oxidation (POX) of Hydrocarbons (Cont.)

- Air is not used because hydrogen separation from nitrogen is difficult ✓
- Partial oxidation can operate with and without catalysts, depending on the feedstock quality. ✓
- For feedstock with high level of impurities (i.e., sulfur), the process proceeds without catalysts and it is called Thermal Partial Oxidation (TPOX) with reaction temperature is typically around 1200 C. ✓
- The Catalytic Partial Oxidation (CPOX) is utilized with feedstocks having low level of impurities; hence, the catalyst reduces the reaction temperature to around 800 C. ✓
- A substantial amount of produced hydrogen in the POX comes from the steam. The amount of hydrogen produced from steam increases up to 83% when coal is used in the POX [Steinberg and Cheng, 1989]. ✓

Source: Steinberg and Cheng, 1989

Gasification of Residual Fuel Oil or Coal

The gasification process is given by the following endothermic and exothermic reactions

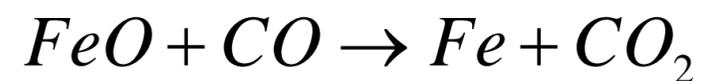
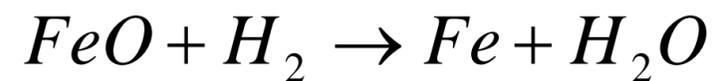
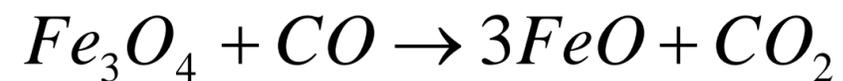


Common gasifiers are the counter-current fixed bed, co-current fixed bed, fluidized bed, entrained flow, plasma, and free radical.

The Integrated Gasification Combine Cycle (IGCC) utilizes high pressure gasifiers to convert coal to purified syngas. The syngas purification is achieved through a pre-combustion separation process that removes CO₂ and other impurities.

The steam-iron process is basically a coal-based process in which hydrogen is derived from the steam reacting with iron oxide. ➤

The process mainly composed of four stages. Initially, coal is gasified with steam and air to produce the syngas, which is then mixed with iron oxide in an iron regenerator where the following reactions occur: ➤



Not all syngas is completely converted in the iron oxide reduction. The regenerated iron then goes into the steam-iron reactor where it oxidizes by steam to produce Fe_3O_4 and a hydrogen rich gas. ➤