કલ્પક્કમનો ઐતિહાસિક પ્રોટોટાઈપ ફાસ્ટ બ્રિડર રિએક્ટર (PFBR) માં "ક્રિટિકલિટી" શું છે?

કલ્પક્કમમાં આવેલ પ્રોટોટાઈપ ફાસ્ટ બ્રિડર રિએક્ટરનો ઈતિહાસ ભારતની લાંબી વૈજ્ઞાનિક યાત્રા અને દ્રષ્ટિનું પરિણામ છે. આ પ્રોજેક્ટ કોઈ એક દિવસમાં શરૂ થયો નહોતો, પરંતુ દાયકાઓના સંશોધન, આયોજન અને પ્રયોગો બાદ આ સિદ્ધિ પ્રાપ્ત થઈ છે. આ ઈતિહાસની શરૂઆત 1950ના દાયકામાં થાય છે, જ્યારે હોમી જહાંગીર ભાભાએ ભારત માટે ત્રણ-ચરણ પરમાણુ ઊર્જા કાર્યક્રમની કલ્પના કરી. તેમણે સમજ્યું કે ભારત પાસે યુરેનિયમ મર્યાદિત છે પરંતુ થોરિયમનો ભંડાર વિશાળ છે, તેથી તેમણે એવી યોજના બનાવી જેમાં પહેલા યુરેનિયમનો ઉપયોગ, પછી પ્લૂટોનિયમ અને અંતે થોરિયમ આધારિત ઊર્જા વિકાસ થાય.

આ દ્રષ્ટિને આગળ વધારવા માટે 1970ના દાયકામાં કલ્પક્કમ ખાતે "ફાસ્ટ બ્રિડર ટેસ્ટ રિએક્ટર (FBTR)" બનાવવામાં આવ્યો. આ નાનો રિએક્ટર ભારત માટે એક પ્રયોગશાળા સમાન હતો, જ્યાં વૈજ્ઞાનિકોએ સોડિયમ કૂલિંગ, ફાસ્ટ ન્યુટ્રોન ટેક્નોલોજી અને મટીરિયલ સાયન્સમાં અનુભવ મેળવ્યો. આ અનુભવ PFBR માટેનો આધાર બન્યો.

ત્યારબાદ 2003માં ભારત સરકારે PFBR પ્રોજેક્ટને સત્તાવાર મંજૂરી આપી અને ભારતીય નાભિકીય વિદ્યુત નિગમ લિમિટેડ (BHAVINI) ની સ્થાપના કરવામાં આવી, ખાસ કરીને ફાસ્ટ બ્રિડર રિએક્ટર બનાવવા માટે. 2004માં PFBRનું નિર્માણ શરૂ થયું, અને તેનો મૂળ લક્ષ્ય 2010 સુધી પૂર્ણ કરવાનો હતો.

પરંતુ આ પ્રોજેક્ટ "First-of-its-kind" ટેક્નોલોજી હોવાથી અનેક ટેકનિકલ પડકારો આવ્યા. ખાસ કરીને લિક્વિડ સોડિયમ કૂલિંગ સિસ્ટમ, હાઈ-ટેમ્પરેચર મટીરિયલ્સ અને જટિલ ન્યુક્લિયર સિસ્ટમ્સના કારણે પ્રોજેક્ટમાં વિલંબ થયો. 2012માં પ્રોજેક્ટનો ખર્ચ ફરીથી સુધારવામાં આવ્યો અને સમયમર્યાદા પણ આગળ ધપાવવામાં આવી.

આગળ વધતાં 2023માં રિએક્ટરના મુખ્ય વેસલમાં હજારો ટન લિક્વિડ સોડિયમ ભરવામાં આવ્યું, જે એક મહત્વપૂર્ણ ટેકનિકી પગલું હતું. ત્યારબાદ 4 માર્ચ 2024ના રોજ પ્રધાનમંત્રી દ્વારા "કોર લોડિંગ" પ્રક્રિયાની શરૂઆત કરવામાં આવી, જેમાં રિએક્ટરમાં ઈંધણ મૂકવાનું શરૂ થયું.

2025 દરમિયાન આખરી ફ્યુઅલ લોડિંગ પૂર્ણ થયું અને તમામ સુરક્ષા ચકાસણીઓ બાદ રિએક્ટર "ક્રિટિકલિટી" માટે તૈયાર બન્યો. અંતે 6 એપ્રિલ 2026ના રોજ સાંજે 8:25 વાગ્યે PFBRએ સફળતાપૂર્વક પ્રથમ ક્રિટિકલિટી પ્રાપ્ત કરી, એટલે કે નિયંત્રિત અને સ્થિર ન્યુક્લિયર ચેઈન રિએક્શન શરૂ થયું.

પરમાણુ ભૌતિકશાસ્ત્રમાં "ક્રિટિકલિટી" એ એવી સ્થિતિ છે જેમાં ફિશન ચેઇન રિએક્શન સ્વયંભૂ અને નિયંત્રિત રીતે ચાલે છે. દરેક ફિશન ઘટના દરમિયાન યુરેનિયમ અથવા પ્લૂટોનિયમના પરમાણુ તૂટી જાય છે અને લગભગ 200 MeV જેટલી ઊર્જા બહાર પડે છે

આ રીતે PFBRનો ઈતિહાસ ત્રણ મુખ્ય તબક્કામાં વહેંચી શકાય.

1. વિચાર અને દ્રષ્ટિ (1950-1970): ભાભાની યોજના અને પ્રાથમિક સંશોધન
2. પ્રયોગ અને વિકાસ (1970-2003): FBTR અને ટેક્નોલોજી તૈયારીઓ અને
3. નિર્માણ અને સફળતા (2004-2026): PFBRનું બાંધકામ અને ક્રિટિકલિટી.

સાયન્સ એન્ડ નોલેજ

★ ધનંજય રાવલ

આ આખી યાત્રા દર્શાવે છે કે PFBR માત્ર એક રિએક્ટર નથી, પરંતુ ભારતની વૈજ્ઞાનિક ધીરજ, સંશોધન શક્તિ અને આત્મનિર્ભરતાનું જીવંત ઉદાહરણ છે. આજે PFBR ભારતને તેના ત્રણ-ચરણ પરમાણુ કાર્યક્રમના બીજા તબક્કામાં લઈ ગયું છે અને ભવિષ્યમાં થોરિયમ આધારિત ઊર્જા યુગ તરફ આગળ વધવાનો માર્ગ ખુલ્લો કર્યો છે. આ રિએક્ટરનું ડિઝાઈન અને સંશોધન ઈન્દિરા ગાંધી સેન્ટર ફોર એટોમિક રિસર્ચ દ્વારા કરવામાં આવ્યું છે.

પરમાણુ ભૌતિકશાસ્ત્રમાં "ક્રિટિકલિટી" એ એવી સ્થિતિ છે જેમાં ફિશન ચેઈન રિએક્શન સ્વયંભૂ અને નિયંત્રિત રીતે ચાલે છે. દરેક ફિશન ઘટના દરમિયાન યુરેનિયમ અથવા પ્લૂટોનિયમના પરમાણુ તૂટી જાય છે અને લગભગ 200 MeV જેટલી ઊર્જા બહાર પડે છે. "ક્રિટિકલિટી" પરમાણુ રિએક્ટર માટે એક ખૂબ જ મહત્વપૂર્ણ વૈજ્ઞાનિક સ્થિતિ છે. સરળ ભાષામાં સમજીએ તો, રિએક્ટરના અંદર પરમાણુ ફિશન (વિખંડન) થાય છે, જેમાં એક પરમાણુ તૂટીને ઊર્જા અને ન્યુટ્રોન છોડે છે. આ ન્યુટ્રોન બીજા પરમાણુઓને તોડે છે અને આ પ્રક્રિયા ચેઈન રિએક્શન તરીકે આગળ વધે છે. જ્યારે આ ચેઈન રિએક્શન સંપૂર્ણ સંતુલનમાં ચાલે છે, ત્યારે તેને "ક્રિટિકલિટી" કહેવામાં આવે છે. આ સ્થિતિમાં રિએક્ટરનો "મલ્ટિપ્લિકેશન ફેક્ટર" $k = 1$ હોય છે. તેનો અર્થ એ છે કે એક ફિશનથી જેટલા ન્યુટ્રોન ઉત્પન્ન થાય છે, તેમાંથી માત્ર એટલા જ ન્યુટ્રોન આગળના ફિશન માટે ઉપયોગી થાય છે. એટલે કે, રિએક્શન ન તો ઝડપથી વધે છે અને ન તો ધીમું પડે છે. તે સ્થિર રીતે ચાલુ રહે છે. જો $k < 1$ હોય, તો રિએક્શન ધીમે ધીમે બંધ થઈ જાય છે (સબ-ક્રિટિકલ સ્થિતિ). જો $k > 1$ હોય, તો રિએક્શન ઝડપથી વધે છે (સુપર-ક્રિટિકલ સ્થિતિ), જે જોખમી બની શકે છે. પરંતુ $k = 1$ પર રિએક્ટર સંપૂર્ણ નિયંત્રણમાં રહે છે અને સુરક્ષિત રીતે સતત ઊર્જા ઉત્પન્ન કરે છે. આ રીતે, "ક્રિટિકલિટી" એ એવી આદર્શ સ્થિતિ છે જેમાં પરમાણુ રિએક્ટર સલામત રીતે અને સ્થિર રીતે કામ કરે છે, અને વીજળી ઉત્પાદન માટે સતત ઊર્જા આપે છે.

આ ઊર્જા થર્મલ એનર્જીમાં રૂપાંતરિત થાય છે અને અંતે સ્ટીમ ટર્બાઈન દ્વારા વીજળીમાં બદલાય છે. PFBRમાં "ફાસ્ટ ન્યુટ્રોન સ્પેક્ટ્રમ" હોય છે, એટલે કે ન્યુટ્રોનની ઊર્જા લગભગ 1 MeV અથવા તેથી વધુ હોય છે, જે બ્રીડિંગ પ્રક્રિયાને વધુ અસરકારક બનાવે છે. PFBRની કાર્યપદ્ધતિમાં સૌથી મહત્વપૂર્ણ તત્વ છે "બ્રીડિંગ રેશિયો". જો રિએક્ટર 1 કરતાં વધુ બ્રીડિંગ રેશિયો ધરાવે, તો તે વપરાતા કરતાં વધુ ફિશાઈલ મટીરિયલ ઉત્પન્ન કરે છે. PFBRમાં કોરની આસપાસ યુરેનિયમ-238 નો બ્લેન્કેટ રાખવામાં આવે છે, જે ફાસ્ટ ન્યુટ્રોનને શોષી લઈને પ્લૂટોનિયમ-239 બનાવે છે. આ પ્રક્રિયામાં બે બેટા-ડિકે થાય છે, જેના કારણે અંતે પ્લૂટોનિયમ-239 ઉત્પન્ન થાય છે. આ જ પ્રક્રિયા PFBRને "ફ્યુઅલ ફેક્ટરી" બનાવે છે.

PFBRમાં "લિક્વિડ સોડિયમ કૂલન્ટ" નો ઉપયોગ થાય છે, જેની થર્મલ કન્ડક્ટિવિટી પાણી કરતાં ઘણી વધારે છે. સોડિયમનું બોઈલિંગ પોઈન્ટ લગભગ 883C છે, તેથી તે ખૂબ ઊંચા તાપમાને પણ પ્રવાહી રહે છે. આથી રિએક્ટર વધુ કાર્યક્ષમ રીતે હાઈ-ટેમ્પરેચર ઓપરેશન કરી શકે છે. પરંતુ સોડિયમ હવા અને પાણી સાથે ખૂબ જ પ્રતિક્રિયાશીલ છે, એટલે સોડિયમ લીકેજ અટકાવવા માટે "ડબલ લૂપ સિસ્ટમ" અને ઈનર્ટ ગેસ (જેમ કે આર્ગોન) નો ઉપયોગ કરવામાં આવે છે.

PFBRની અંદર "ન્યૂટ્રોન ઈકોનોમી" ખૂબ જ મહત્વપૂર્ણ છે. અહીં ન્યૂટ્રોનનું ઓછું નુકસાન થાય તે માટે પાણી જેવા મૉડરેટરનો ઉપયોગ કરવામાં આવતો નથી.

...અનુસંધાન પાના નં. 10 પર